Agriculture Canada

Publication 1865/F

La culture des tomates en serre sur sol et sans sol

Canada

92-02511/

La culture des tomates en serre sur sol et sans sol

A. P. Papadopoulos
Station de recherches
Harrow (Ontario)

Illustration de la couverture
Photo : Faye Clack Associates, avec l'autorisation du
Greenhouse Vegetable Producers Marketing Board

Agriculture Canada Publication 1865/F
On peut en obtenir des exemplaires à la
Direction générale des communications
Agriculture Canada, Ottawa (Ont.) K1A OC7

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1991
N° de cat. A53-1865/1991F ISBN 0-662-96886-7
Impression 1991 2M-10:91

Production du Service aux programmes de recherches

Also available in English under the title
Growing greenhouse tomatoes in soil and soilless media

Table des matières

Introduction 6

Chapitre 1 La tomate 6
Origine 6
Croissance déterminée et croissance indéterminée 7
Amélioration de la plante 7
Germination des graines 7
Début de croissance et développement 9
La fleur 12
Le fruit 12

Chapitre 2 Conditions ambiantes 12
Température 12
Lumière 15
Humidité relative 15
Gaz carbonique 15
Circulation de l'air 16

Chapitre 3 Besoins nutritifs 16
Rapport sol–plante 16
Croissance végétative et reproductivité 22
Besoins nutritifs et résultats de la fertilisation 22

Chapitre 4 Pratiques culturales générales 26
Calendrier de culture 26
Sélection des cultivars 26
Multiplication végétative 28
Espacement des plants 37
Taille et tuteurage 38
Pollinisation et édrageonnage 42
Récolte et entreposage 43

Chapitre 5 Culture classique sur sol 44
Types de sol recommandés 44
Drainage 44
Irrigation par inondation et lessivage 45
Matière organique 45
Maîtrise du pH 47
Application d'engrais avant la plantation 50
Travail du sol 50
Arrosage 51
Calendrier de fertilisation 51
Paillage 51

Chapitre 6 Culture sur sol avec irrigation goutte-à-goutte 53

Chapitre 7 Culture sur tourbe et sur d'autres milieux organiques 55
Culture en bac 55
Culture en sac de tourbe 59
Système Harrow de culture en sac de tourbe 63
Culture dans la sciure 64

Chapitre 8 Culture dans la laine de roche et dans d'autres milieux inertes 68

Chapitre 9 Culture sur film nutritif et autres systèmes de culture hydroponique 74

Introduction

La tomate est la plus importante culture légumière de serre au Canada. Sa production peut avoir lieu au printemps ou à l'automne, et les conditions et les problèmes varient d'après la saison. Pour la culture de printemps, on fait généralement le semis durant la première ou la deuxième semaine de novembre, le repiquage en serre durant la première semaine de janvier et la récolte entre la mi-mars et le mois de juillet, bien que certains plants produisent jusqu'à l'automne. En raison des journées courtes et sombres qui prévalent en hiver, la culture progresse lentement au début et exige plus de soins de la part du producteur, qui doit faire un usage maximal de la lumière disponible et perdre le moins de photosynthétats possible. Lorsqu'on ne peut conserver un bon équilibre entre le développement végétatif et reproductif pendant les 2 à 3 premiers mois de la culture, le plant de tomate risque d'avoir une croissance excessive et une mauvaise fructification ou d'avoir une fructificaton trop abondante sur des plants endurcis qui poussent très lentement. Les jours plus longs et ensoleillés qui surviennent à mesure que la saison avance ne peuvent compenser une perte de production précoce et lucrative, et la rentabilité en souffre. Malgré tout, la production du printemps demeure la plus importante parce que le prix de la tomate est plus élevé et que la saison est plus longue. Pour la culture d'automne, on fait le semis vers la fin de juin, le repiquage en serre durant la première semaine d'août, et la récolte entre le début d'octobre et la mi-décembre. À l'encontre de la production de printemps, les tomates cultivées à l'automne jouissent d'un excellent début qui est favorisé par les jours ensoleillés et relativement longs en août et en septembre, mais leur maturation a lieu durant les journées courtes de la fin de l'automne et de l'hiver.

Chapitre 1 La tomate

Origine

Le genre *Lycopersicon* de la famille des solonacées serait originaire de la bande côtière de l'ouest de l'Amérique du Sud qui s'étend entre l'équateur et environ 30° de latitude sud, et cette région présente la plus grande diversité génétique. Le genre se divise en deux sous-genres, l'*Eulycopersicon* et l'*Eriopersicon*, et ce dernier renferme les espèces *Lycopersicon pimpinellifolium* et *Lycopersicon esculentum*. L'espèce *Lycopersicon pimpinellifolium* est souvent désignée sous le nom de tomate groseille ou tomate à grappes, et ses fruits mesurent moins de 10 mm de diamètre. L'espèce *Lycopersicon esculentum* comprend des variétés à gros fruits qui poussent à l'état sauvage ou qui sont cultivées comme plantes annuelles ou vivaces. Les plantes de ces espèces qui appartiennent au sous-genre *Eriopersicon* sont généralement vivaces et poussent à l'état sauvage; leurs fruits vert blanchâtre et velus sont très peu agréables à l'œil et au goût.

Croissance déterminée et croissance indéterminée

Les tomates cultivées comprennent des plants de deux types selon leur comportement et leur vigueur : les plants à croissance indéterminée (grimpants) que l'on taille à une seule tige en supprimant les bourgeons latéraux, comme ceux des tomates cultivées en serre; et les plants à croissance déterminée (buissonnants) que l'on sème en pleine terre et auxquels on laisse tous les bourgeons latéraux qui se terminent par une grappe. (fig. 1). En théorie, toutes les variétés à croissance indéterminée sont des plantes vivaces, et toutes celles à croissance déterminée sont des plantes annuelles.

Amélioration de la plante

La méthode la plus simple et la plus ancienne d'améliorer la tomate consistait à recueillir les graines des plantes qui présentaient les qualités recherchées, comme un rendement élevé et une bonne saveur. Cette méthode fonctionne seulement quand il y a diversité génétique au départ, et que la plante se reproduit fidèlement (c'est-à-dire que les qualités recherchées sont transférées intactes d'une génération à l'autre). Ces dernières années, de nombreuses techniques de croisement ont permis d'améliorer considérablement la tomate de culture. On parvient le plus souvent à créer de nouveaux hybrides F_1 en croisant des cultivars existants ou des lignées pures sélectionnées à cette fin (fig. 2). Cette méthode est fondée sur l'aptitude du sélectionneur à choisir le matériel parental avec lequel il obtiendra un hybride de qualité. Il s'agit d'un bon moyen de transmettre au matériel parental les diverses caractéristiques que l'on désire. Toutefois, comme les hybrides F_1 ne se reproduisent pas fidèlement, on doit utiliser à chaque nouvelle culture des graines fraîches d'hybrides produites annuellement à partir des lignées parentales. La compagnie qui détient le matériel parental a donc le monopole de la distribution des graines de l'hybride. Le producteur de tomates ne peut pas réaliser d'économie en recueillant la semence d'un hybride de tomate, car elle est parfaitement inutile.

Germination des graines

La tomate donne des graines satinées de 3 à 5 mm qui renferment un gros embryon spiralé et enrobé d'une petite quantité d'endosperme; elles conservent toutefois leur viabilité pendant de nombreuses années après la récolte, et une germination est possible après 10 ans dans 90 % des cas lorsque les graines sont gardées dans un endroit frais et sec. Le premier indice de germination est l'apparition de la petite racine blanche appelée radicule (fig. 3). À mesure que la radicule s'enfonce dans le substrat de croissance, l'hypocotyle (portion de la tige située sous les cotylédons) adopte une forme courbe désignée sous le nom de crochet plumulaire. Ce crochet s'allonge jusqu'à la surface du sol, où la lumière contribue à le redresser et à le verdir. Lorsque la graine est fermement ancrée dans le sol

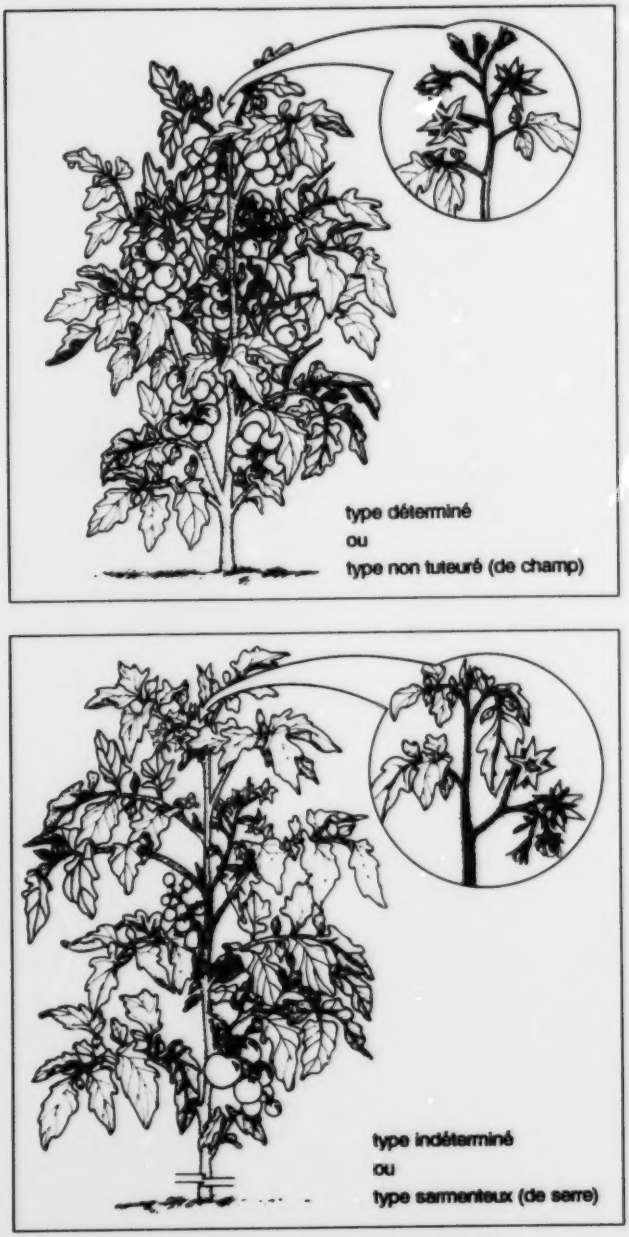

Fig. 1 Les deux modes de croissance de la tomate.

et que le crochet plumulaire est redressé, les cotylédons (feuilles germinales) se détachent de l'enveloppe (tégument) de la graine et le tégument reste dans le sol. Toutefois, un milieu de croissance trop meuble empêche les cotylédons de se séparer du tégument, et la plantule est souvent déformée (fig. 3). La tomate possède une racine pivotante bien structurée et un grand nombre de racines latérales fibreuses. Il est possible de favoriser le développement d'un plus grand nombre de racines fibreuses en taillant la racine pivotante, une opération réalisée lorsqu'on retire la plantule de la caissette de semis pour la transplanter dans un pot. La plante développe rapidement sur la tige des racines adventives (aériennes) qui sont fort utiles lorsque les racines sont endommagées ou atteintes de maladie; une couche de sol ou de tourbe humide (la tourbe est préférable) placée à la base de la tige favorise la formation de nouvelles racines à cet endroit. Une fois que les cotylédons sont entièrement formés, les vraies feuilles apparaissent peu après au point de croissance.

Début de croissance et développement

Après la formation de plusieurs feuilles (de 7 à 12), le point de croissance passe du mode végétatif au mode reproductif et une première grappe de boutons floraux se forme et donne la première grappe florale. La croissance végétative se poursuit par l'émission d'un bourgeon latéral partant de l'aisselle de la dernière feuille. Ce bourgeon latéral produit quelques feuilles (de 2 à 4), après quoi il se différencie pour former une deuxième grappe florale et un nouveau point de croissance végétative. Le plant de tomate de serre croît à mesure que les bourgeons latéraux se développent, un processus désigné sous le nom de croissance sympodique ou indéterminée (fig. 4). Il se produit une chose bizarre chaque fois que la plante devient végétative et qu'il apparaît une nouvelle pousse à l'aisselle de la dernière feuille : en effet, cette dernière feuille, qui pousse avant que la fleur commence à se développer, remonte sur le prolongement axillaire et se retrouve finalement à un point de la tige plus élevé que la grappe florale.

Il en résulte que la tige a l'air continue et que les grappes semblent sortir d'entre deux nœuds, alors qu'elles poussent véritablement à l'aisselle de la feuille située immédiatement au-dessus d'elles. Il arrive que de vigoureux bourgeons latéraux se développent à partir de plusieurs feuilles, ce qui rend difficile la tâche de repérer le bourgeon terminal et de déterminer les bourgeons qu'il faut supprimer. Pour s'assurer de ne pas tailler accidentellement le bourgeon terminal, il faut toujours enlever les pousses qui naissent à l'aisselle de la feuille située immédiatement au-dessous de chaque grappe, ce qui permet de conserver intact le principal point de croissance de chaque plante. Le nombre de feuilles qui poussent avant l'apparition de la première grappe florale varie d'un cultivar à l'autre, et il est également influencé par les conditions environnementales. La plupart des cultivars produisent au moins sept feuilles avant l'apparition de la première grappe florale, et il pousse généralement trois feuilles entre les grappes subséquentes.

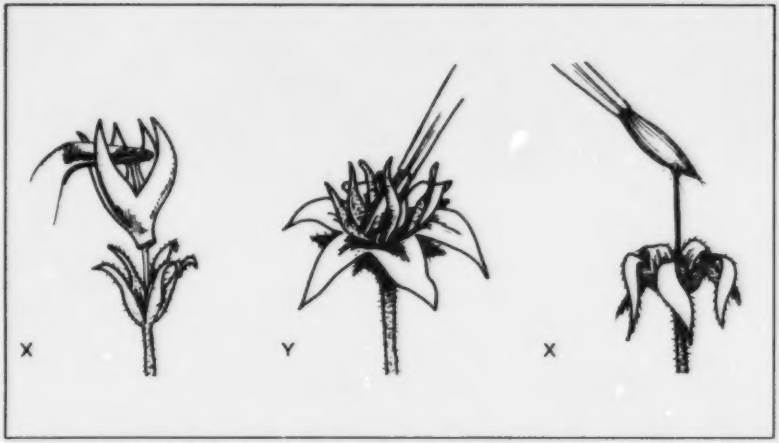

Fig. 2 Pollinisation croisée de deux lignées parentales de tomate pour la production de graines hybrides F_1.

La pollinisation croisée impose l'enlèvement des anthères du parent X avant que le pollen soit libéré.

Le tube pollinique du parent Y est ouvert lorsque le pollen est présent, et le pollen est recueilli avec une brosse souple.

Le pollen du parent Y est déposé sur les stigmates du parent X. Les graines de tomate produites ainsi ont les caractères des parents X et Y.

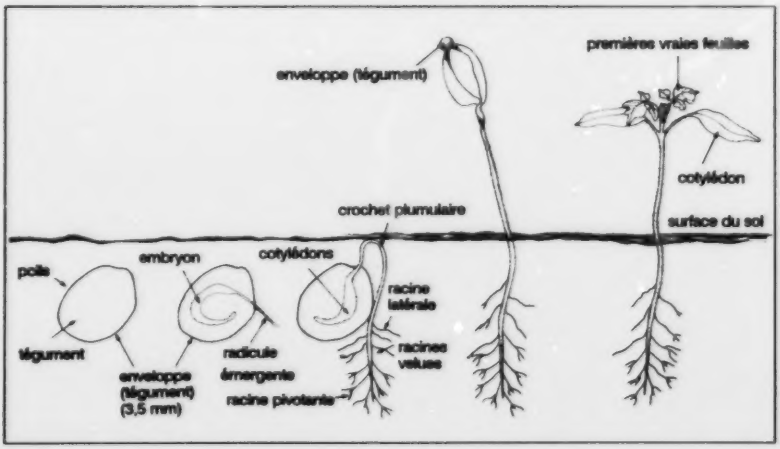

Fig. 3 Germination de la graine de tomate.

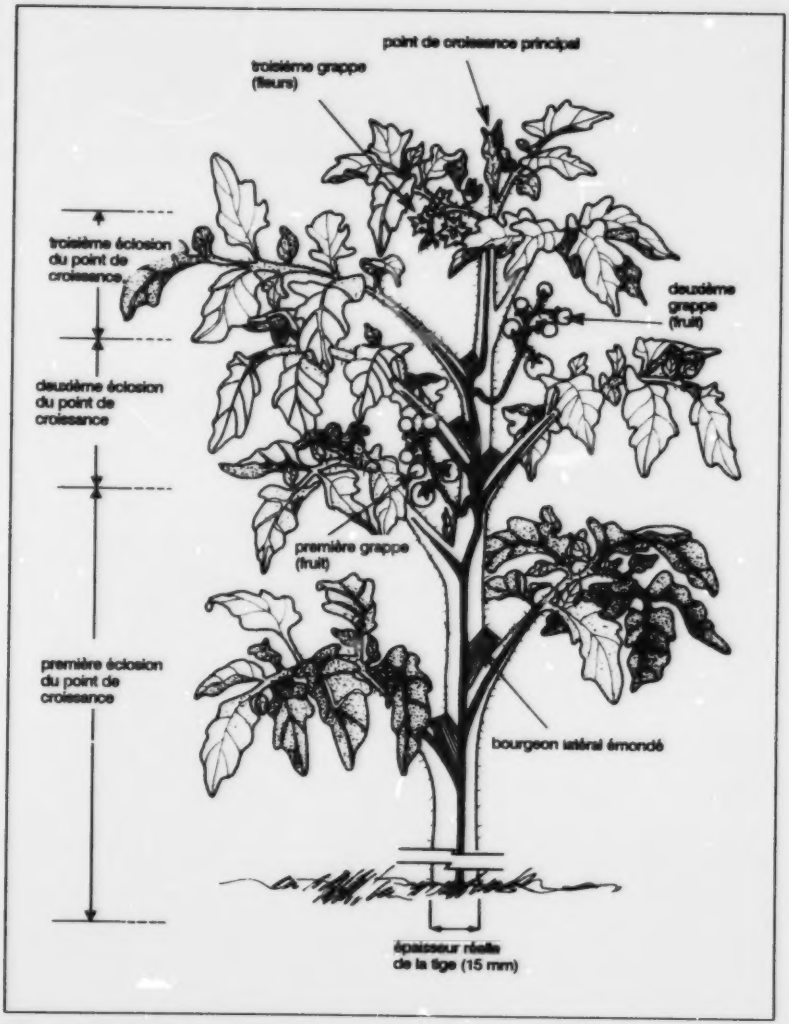

Fig. 4 Croissance sympodique ou indéterminée du plant de tomate généralement cultivé en serre.

La fleur

La grappe floral de la tomate se compose d'une succession d'aisselles portant chacune une seule fleur (fig. 5). La tige principale de la grappe (pédoncule) peut se ramifier une ou plusieurs fois; la ramification ou le dédoublement des grappes peut être favorisé(e) par un traitement à basse température, procédé décrit plus loin dans le texte. La ramification est souhaitable du fait qu'elle augmente généralement le nombre de fleurs par grappe et qu'elle permet d'uniformiser passablement le nombre de fleurs sur chaque branche, quel que soit le degré de ramification (fig. 5). Les fleurs jaune clair de la tomate cultivée sont caractéristiques et généralement composées de cinq sépales qui constituent le calice et de cinq pétales qui constituent la corolle, même s'il est possible d'observer six de ces segments ou plus (fig. 6).

Les étamines (organes mâles) sont constituées d'une partie grêle, le filet, et d'une partie renflée, l'anthère, qui forment une sorte de cylindre à ouverture étroite appelé tube pollinique. Le style, une partie du pistil (organe femelle), est généralement plus court que le tube pollinique, et le stigmate qui reçoit le pollen se trouve donc à l'intérieur du tube pollinique. L'autopollinisation est assurée puisque le pollen est répandu à partir de l'intérieur du tube pollinique (fig. 6). L'autopollinisation est d'autant plus importante que la fructification peut être réduite de beaucoup lorsque l'éclairement est faible et que le style devient plus long que le tube pollinique.

Le fruit

La tomate, classée comme une baie, est un ovaire élargi formé de deux loges ou plus (fruit loculaire) qui renferme des graines (ovules fécondés) enveloppées dans un placenta gélatineux (fig. 7).

Chapitre 2 Conditions ambiantes

L'environnement dans lequel croissent les tomates a un effet considérable sur la productivité et la rentabilité de la culture. L'étude de l'environnement n'est pas exhaustive dans le présent chapitre; elle porte uniquement sur la température, l'éclairement, l'humidité relative, le gaz carbonique et la circulation de l'air. On traite ailleurs dans le texte d'autre sujets connexes comme l'arrosage et les éléments nutritifs.

Température

La température de l'air est la composante environnementale qui influence le plus la croissance végétative, la formation des grappes florales, la fructification, le développement des fruits, le mûrissement et la qualité des fruits. La température moyenne quotidienne serait responsable du rythme

Fig. 5 La grappe de fleurs de la tomate.

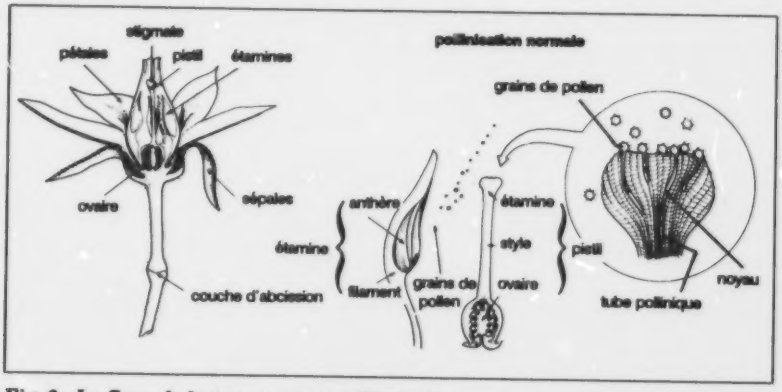

Fig. 6 La fleur de la tomate et sa pollinisation.

La tomate est une plante autogame dont les fleurs sont complètes, c'est-à-dire qu'elles possèdent des organes mâle et femelle. Lorsque la fleur n'est pas fécondée, elle se détache à la zone d'abscission et tombe.

Pollinisation Les grains de pollen sont libérés par les anthères et transportés sur le stigmate, habituellement de la même fleur, en tombant ou en flottant dans l'air, et ils collent à sa surface gluante.

Fécondation La fructification a lieu lorsque les grains de pollen, qui ont germé sur le stigmate et formé le tube pollinique avec un noyau, descendent dans le style et atteignent l'ovaire qui contient les ovules.

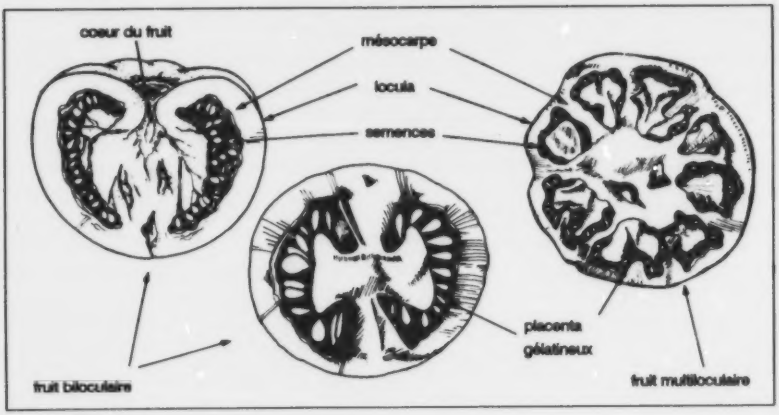

Fig. 7 Le fruit de la tomate.

de croissance de la culture : plus la température moyenne de l'air est élevée, plus la croissance est rapide. On considère aussi que plus l'écart est grand entre la température de jour et la température de nuit, plus la plante est haute et plus les feuilles sont petites. La croissance maximale a lieu lorsque la température est d'environ 25 °C le jour comme la nuit, mais on obtient une production de fruits maximale lorsque la température est maintenue à 18 °C la nuit et à 20 °C le jour. Les températures recommandées ci-après représentent donc un compromis pour obtenir une bonne productivité constante et une croissance végétative modérée tout au long de la saison de culture.

Températures de l'air recommandées

	Éclairement faible	Éclairement intense	Avec gaz carbonique
Temp. min. de nuit	17 °C	18 °C	18 °C
Temp. min. de jour	19 °C	21 °C	21 °C
Ventilation	21 °C	24 °C	26 °C

Note

- Avec les cultivars résistants au froid comme le Vendor, les températures peuvent être de 1 à 2 °C inférieures à celles recommandées. Toutefois, pour les cultivars vigoureux comme le Ohio CR-6, les températures recommandées sont un minimum absolu.
- Par temps très ensoleillé, une température supérieure à 26 °C n'est pas préjudiciable aux plantes; toutefois, une température supérieure à 29 °C endommage les bourgeons de la plupart des cultivars (sauf le Ohio CR-6).
- On recommande une température minimale du sol de 14 °C.

Lumière

La lumière est absolument nécessaire à la croissance des plantes. La matière végétale est produite par photosynthèse, et ce processus est seulement possible lorsque la lumière est absorbée par la chlorophylle (pigment vert) contenue dans les parties vertes de la plante, surtout dans les feuilles. Pendant la photosynthèse, l'énergie lumineuse sert à fixer le gaz carbonique de l'air à l'humidité de la plante pour produire des hydrates de carbone comme les glucides et l'amidon. La photosynthèse est généralement fonction de l'intensité lumineuse, mais elle n'est pas proportionnelle à cette intensité. Pour la culture des tomates, l'éclairement a plus d'importance en hiver, car la lumière naturelle n'est pas suffisante durant cette saison. Durant les journées courtes et sombres de la fin de l'automne, de l'hiver et du début du printemps, le développement du bouton floral est interrompu et les grappes ne produisent ni fleurs ni fruits. Cette interruption de la végétation est attribuable au peu d'énergie radiante disponible durant le jour, qui se traduit par une production insuffisante d'hydrates de carbone. Les mauvaises conditions d'éclairement réduisent non seulement l'activité photosynthétique, mais les hydrates de carbone, produits en quantité limitée durant le jour, sont employés par la plante pour lui permettre de survivre pendant les longues nuits. Les plants de tomates parvenus à maturité profitent de toute augmentation de l'intensité lumineuse naturelle, pourvu que les plantes soient bien approvisionnées en eau, en éléments nutritifs et en gaz carbonique, et que la température de l'air ne soit pas trop élevée.

Humidité relative

Les effets de l'humidité relative sur le rendement de la tomate ne sont pas bien connus. La culture peut supporter une humidité relative qui varie de très faible à très élevée, pourvu que les écarts ne soient pas trop prononcés ou fréquents. Lorsque le taux d'humidité relative est bas, l'irrigation est absolument nécessaire, et lorsqu'il est élevé, des maladies peuvent se manifester. La croissance est généralement favorisée par un taux élevé d'humidité relative, et un taux élevé durant le jour peut aussi améliorer la fructification. Toutefois, ces mêmes conditions mal contrôlées peuvent très bien former une condensation sur les plantes et favoriser l'apparition de maladies graves.

Gaz carbonique

Par temps froid et s'il n'y a pas de ventilation, on recommande durant le jour une concentration minimale de gaz carbonique de 1 000 vpm (*N* 1 000 ppm). Durant l'été et en utilisant la ventilation, certains pays ont constaté que l'application supplémentaire de gaz carbonique jusqu'à concurrence de 400 ppm s'est avérée rentable, mais cette technique est trop nouvelle au Canada pour justifier une recommandation ferme en ce sens. Les régions qui jouissent d'un climat tempéré par la mer, comme la Colombie-

Britannique, sont plus susceptibles de profiter d'une application de gaz carbonique en été. Toutefois, dans les régions au climat continental, comme le sud-ouest de l'Ontario, il est probable qu'il faudrait une trop grande ventilation dans les serres pendant tout l'été et cette condition rendrait la culture de la tomate non rentable.

Circulation de l'air

La circulation horizontale de l'air est utile pour diverses raisons. On recommande un déplacement d'air d'environ 1 m/s[1] qui fait bouger légèrement les feuilles. La circulation horizontale de l'air contribue à réduire les gradients de température de l'air dans la serre, à supprimer l'humidité dans la partie la plus basse de la serre (sous le feuillage), à répartir l'humidité dans le reste de la serre, à faire descendre le gaz carbonique accumulé au sommet de la serre et à le faire pénétrer dans le couvert végétal où il est absorbé et fixé par photosynthèse, et même à favoriser la pollinisation. Un faible déplacement de l'air dans la serre permet de mieux uniformiser l'environnement de la serre, ce qui est une condition généralement bénéfique pour la productivité de la culture et la conservation de l'énergie.

Chapitre 3 Besoins nutritifs

Rapport sol-plante

Les plantes qui poussent dans la nature ont presque toutes une association avec le sol désignée sous le nom de rapport sol-plante. Le sol répond aux quatre besoins fondamentaux des plantes : l'eau, les éléments nutritifs, l'oxygène et le support. Grâce aux progrès de la science et de la technologie, on a pu créer un milieu artificiel pour répondre à ces besoins et faire pousser des plantes sans sol. Toutes les méthodes de culture mises au point pour la production de plantes sans sol sont collectivement appelées méthodes de culture sans sol. Elles regroupent divers systèmes se situant entre la culture exclusivement hydroponique, qui ne requiert que de l'eau et des éléments nutritifs comme la culture sur film nutritif (NFT) et les systèmes à base de mélanges artificiels qui renferment du sol en proportions diverses. On trouve entre ces deux extrêmes un grand nombre de méthodes de culture sans sol qui font appel à divers milieux de croissance inertes (laine de roche, polyuréthane et perlite) ou non inertes (gravier, sable et tourbe).

[1] Mètre par seconde.

Propriétés physico-chimiques du sol

Le sol se compose de minéraux, de matière organique, d'eau et d'air. Le meilleur sol pour la culture des plantes renferme 45 % de minéraux, 5 % de matière organique, 25 % d'eau et 25 % de vides. Les minéraux sont formés d'un grand nombre de petits fragments de pierre. La matière organique du sol provient des déchets végétaux et animaux, et elle est un mélange de ces substances rendues à divers stades de décomposition. Certains éléments organiques sont oxydés durant la décomposition et donnent un produit final, tandis que d'autres forment un produit transitoire appelé humus. Le type et la quantité relative d'éléments minéraux et organiques déterminent les propriétés chimiques d'un sol. Les propriétés chimiques dépendent de la proportion des divers éléments essentiels qui se trouvent dans le sol, de leurs diverses combinaisons et du taux d'acidité ou d'alcalinité indiqué par le pH[2]. L'aptitude des plantes à absorber les éléments nutritifs nécessaires dépend non seulement des propriétés chimiques du sol, mais aussi de ses propriétés physiques.

Structure et texture du sol

Les propriétés physiques du sol décrivent sa texture, c'est-à-dire la répartition granulométrique de ses minéraux exprimée en pourcentage de la teneur en sable, en limon et en argile (fig. 8), ainsi que sa structure, c'est-à-dire le type et l'assemblage des divers éléments minéraux et organiques pour former des agrégats d'aspect grumeleux. La matière organique joue un rôle important dans la structure du sol en raison de la taille diverse de ses éléments, mais surtout parce que l'humus favorise l'agglomération des divers éléments du sol pour former des agrégats d'aspect grumeleux.

La structure joue à son tour un rôle important dans la fertilité du sol, c'est-à-dire sa capacité de soutenir une bonne croissance végétale et un rendement élevé, car elle détermine dans une large mesure la capacité de rétention d'eau et l'aération d'un sol. L'eau retenue dans les pores du sol et les sels dissous dans cette eau constituent la solution du sol, qui remplit un rôle de première importance pour fournir les éléments nutritifs et l'eau nécessaires aux plantes en croissance. L'air emprisonné dans les pores du sol libèrent l'oxygène qui permet aux racines et aux micro-organismes de respirer, en plus d'éliminer le gaz carbonique et d'autres gaz dégagés par les micro-organismes. Les éléments nutritifs se trouvent dans le sol sous forme de composés complexes (organiques ou inorganiques) qui ne sont pas assimilables par les plantes ou sous forme de composés simples qui sont généralement solubles et par conséquent faciles à assimiler par les plantes.

---

[2] Le pH d'une solution est le cologarithme décimal de la concentration en ions d'hydrogène ($pH = -\log[H^+]$). Un pH de 7 indique un milieu neutre, un pH inférieur à 7 indique un milieu acide et un pH supérieur à 7 indique un milieu basique.

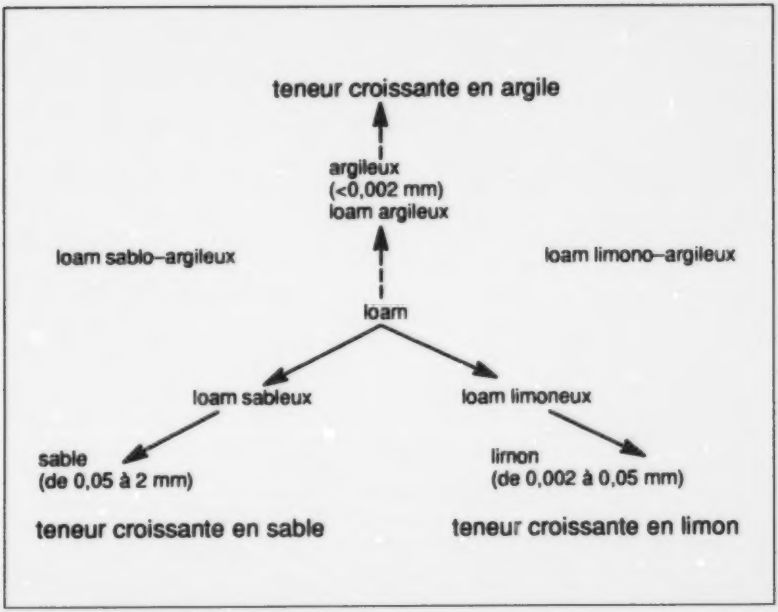

Fig. 8 Classification des sols selon la texture.

Les formes complexes seraient trop nombreuses à énumérer, et elles doivent être transformées en formes simples solubles par décomposition pour devenir assimilables et utiles aux plantes (fig. 9). Le tableau 1 présente les formes assimilables de tous les éléments nutritifs essentiels à la croissance des plantes.

Réaction de la solution du sol (pH)

La réaction de la solution du sol (pH) a également un effet sur la solubilité des divers éléments nutritifs et, par conséquent, sur leur aptitude à être assimilés par les plantes. Le processus est illustré à la figure 10.

Le calcium et le molybdène sont moins accessibles aux plantes dans les sols acides (pH < 7), tandis que les plantes ont de la difficulté à assimiler le fer, le manganèse et le zinc dans les sols alcalins (pH > 7); des quantités excessives de bicarbonate (HCO_3^-) peuvent empêcher l'absorption normale de certains éléments nutritifs. Les plantes peuvent assimiler la plupart des éléments nutritifs lorsque le pH est compris entre 6 et 7, et la plupart des plantes poussent donc mieux dans les sols ayant ce pH.

Capacité d'échange cationique du sol

Lorsqu'on ajoute à l'eau de petites quantités de sels inorganiques comme les minéraux solubles du sol et les engrais commerciaux, ces sels inorganiques se dissocient et se transforment en atomes ou en groupes

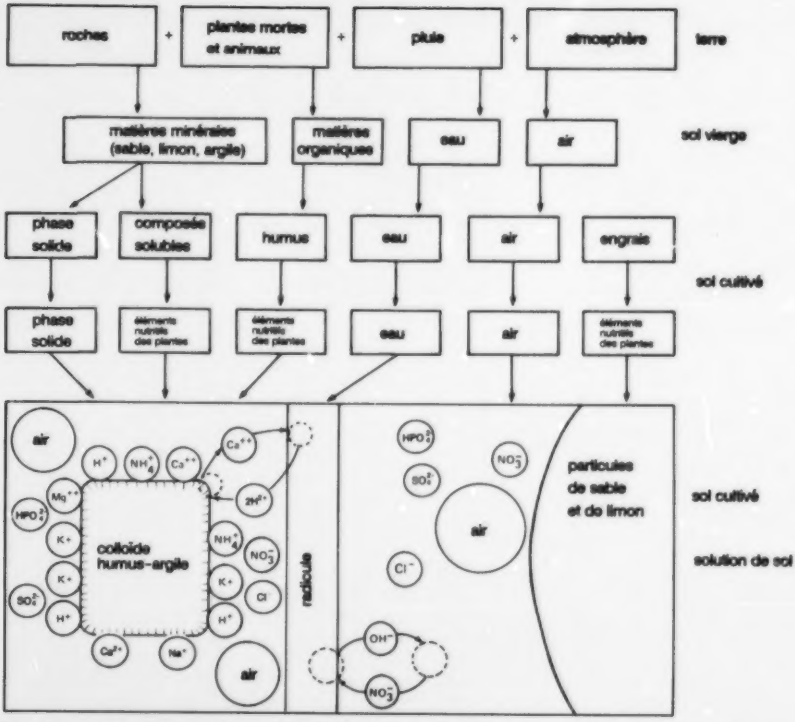

Fig. 9 Les processus de minéralisation, de solubilisation, d'échange cationique et d'absorption d'éléments nutritifs.

d'atomes portant une charge électrique appelée ions. Les ions positifs (cations) comme l'hydrogène (H^+), le potassium (K^+), le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), l'ammonium (NH_4^+), le fer (Fe^{2+}), le manganèse (Mn^{2+}) et le zinc (Zn^{2+}) sont absorbés principalement sur les surfaces à charge négative des colloïdes du sol (particules microscopiques d'argile et d'humus), et ces ions positifs ne se trouvent qu'en petite quantité dans la solution du sol. Ainsi, les colloïdes de l'argile et les colloïdes de l'humus servent d'entrepôt à certains ions essentiels (cations). Les ions négatifs (anions) comme les nitrates (NO_3^-), les phosphates (HPO_4^{2-}), les sulfates (SO_4^{2-}) et les chlorures (Cl^-) se trouvent presque exclusivement dans la solution du sol, et ils peuvent donc être facilement lessivés lorsque le sol est détrempé. Les racines et les poils absorbants sont en contact étroit avec les surfaces colloïdales du sol, qui baignent dans la solution du sol, et l'assimilation d'éléments nutritifs peut donc se faire à partir de la solution du sol ou directement à partir des surfaces colloïdales (échange cationique).

La solution du sol est la source d'éléments nutritifs la plus importante. Toutefois, comme elle est très diluée, ces éléments nutritifs s'épuisent rapidement et doivent être renouvelés par les particules du sol. La partie

Tableau 1 Éléments essentiels à la croissance de la plupart des plantes cultivées

Nom	Symbole	Masse atomique	Forme assimilable
Éléments organiques (tirés de l'air et de l'eau)			
Hydrogène	H	1,00	H_2O
Carbon	C	12,00	CO_2
Oxygène	O	16,00	O_2, H_2O
Macro-éléments (grandes quantités nécessaires)			
Azote	N	14,00	NO_3^- , NH_4^+
Potassium	K	39,10	K^+
Calcium	Ca	40,08	Ca^{2+}
Magnésium	Mg	24,32	Mg^{2+}
Phosphore	P	30,92	$H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}
Soufre	S	32.07	SO_4^{2-}
Oligo-éléments (faibles quantités nécessaires)			
Fer	Fe	55,85	Fe^{3+}, Fe^{2+}
Manganèse	Mn	54,94	Mn^{2+}
Cuivre	Cu	63,54	Cu^{2+}, Cu^+
Bore	B	10,82	BO_3^{3-}, $B_4O_7^{2-}$
Zinc	Zn	65,38	Zn^{2+}
Molybdène	Mo	95,95	MoO_4^{2+}

consolidée du sol agit comme réservoir d'éléments nutritifs, et elle les libère lentement dans la solution du sol grâce à la solubilisation des éléments minéraux et organiques du sol, à la dissolution des sels solubles et à l'échange cationique. L'addition d'engrais commerciaux augmente sensiblement la teneur de la solution du sol en éléments nutritifs.

Les plantes qui absorbent des éléments nutritifs (ions) les échangent pour d'autres ions. Par exemple, afin de permettre l'assimilation d'un ion de potassium (K^+) ou d'un ion d'ammonium (NH_4^+), un ion d'hydrogène (H^+) est libéré dans la solution du sol ou directement dans les colloïdes du sol par l'échange cationique. De même, pour permettre l'assimilation d'un ion de calcium (Ca^{2+}) ou d'un ion de magnésium (Mg^{2+}), deux ions d'hydrogène (H^+) sont libérés par la racine. Ainsi, à mesure que la plante absorbe ces cations essentiels, la solution du sol et les particules colloïdales renferment de plus en plus d'ions d'hydrogène (H^+), et l'on comprend mieux pourquoi les sols deviennent acides (pH réduit) lorsque les cultures absorbent les cations (l'azote ammoniacal [NH_4^+] est un bon exemple). De même, à mesure que les plantes absorbent des anions essentiels comme les

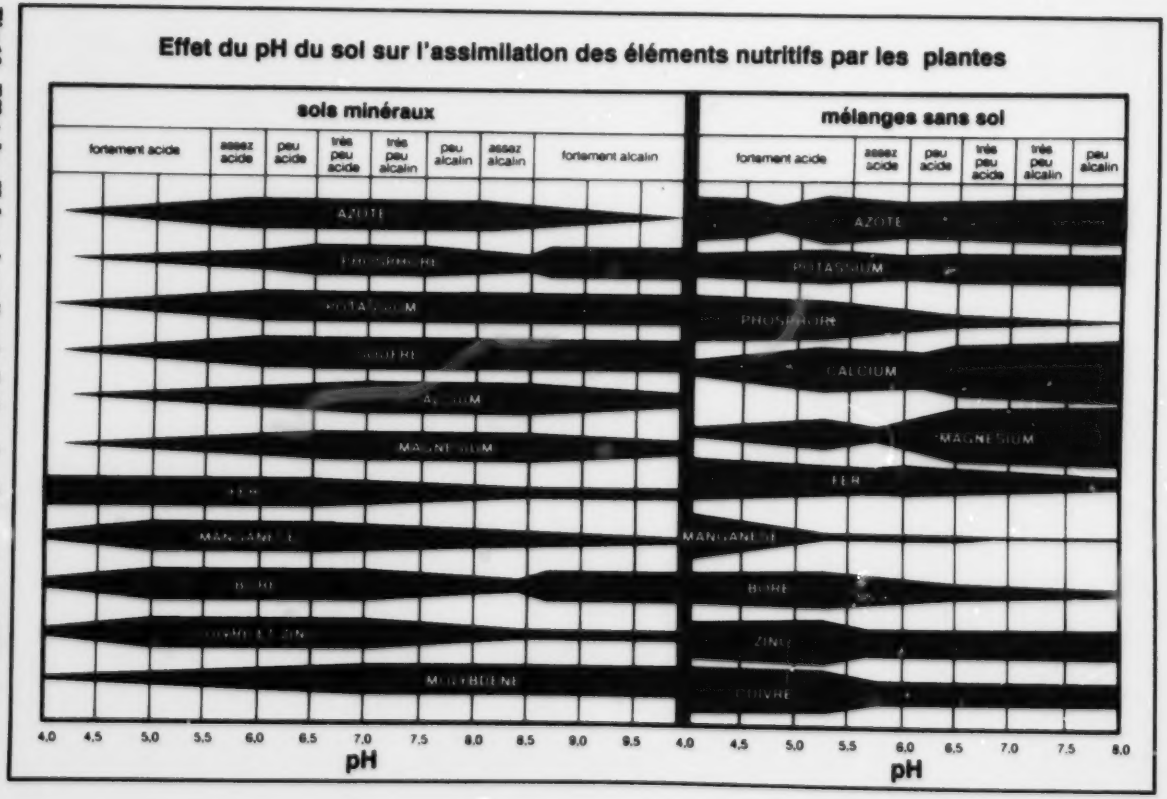

Fig 10 Effet du pH du sol sur l'assimilation des éléments nutritifs par les plantes (avec la permission de Plant Products Ltd.)

nitrates (NO_3^-) et les phosphates (HPO_4^-), la solution du sol s'enrichit de nombreux groupes hydroxyles (OH^-) et de bicarbonates (HCO_3^-), et l'on comprend mieux pourquoi les sols deviennent alcalins (pH élevé) lorsque les cultures absorbent des anions (l'azote nitrique [NO_3^-] est un bon exemple).

Croissance végétative et reproductivité

Pour réussir la culture des tomates, il faut que le producteur maintienne un équilibre optimal entre la croissance végétative et la reproductivité. La seule façon d'obtenir une production de fruits régulière et prolongée consiste à maintenir d'excellentes conditions environnementales et à appliquer au bon moment l'eau et les éléments nutritifs nécessaires. On juge l'équilibre d'une plante à sa tige épaisse, à ses feuilles vert foncé et à ses grosses grappes de fleurs peu espacées et bien formées. Lorsqu'une plante est bien nourrie, sa tige mesure 1 cm d'épaisseur à 15 cm au-dessous du point de croissance. Une tige plus grosse indique une trop forte croissance végétative et elle est généralement associée à une mauvaise fructification et à une faible productivité. Les tiges plus petites indiquent une trop grande reproduction qui se traduit par une carence en hydrates de carbone, une croissance ralentie et une faible productivité.

La méthode la plus répandue et la plus efficace de maîtriser la croissance végétative est de bien doser l'azote et l'eau. L'approvisionnement en eau peut être contrôlé directement en réglant le système d'irrigation ou indirectement en réglant le taux d'humidité relative dans la serre et la conductivité électrique de l'eau d'irrigation. Lorsque l'irrigation est insuffisante, que l'humidité relative est faible et que la conductivité électrique de l'eau d'irrigation est élevée, les plantes absorbent moins d'eau et elles durcissent et poussent au ralenti. De ces trois méthodes d'approvisionnement en eau, la régulation de la conductivité électrique est la plus employée en raison de sa simplicité, de son efficacité et de sa fiabilité. L'apport d'azote peut aussi être régularisé directement en dosant l'engrais azoté ou indirectement en variant l'apport d'autres éléments nutritifs comme le potassium. Certains producteurs donnent aux plantes un engrais ayant un rapport potassium/azote élevé dans le but de réduire leur rythme de croissance.

Besoins nutritifs et résultats de la fertilisation

Malgré le fait que les éléments inorganiques ne représentent que 1 % du poids total de la plante, l'application d'engrais est très importante puisqu'elle a une grande incidence sur la croissance et le développement de la plante et sur la quantité et la qualité des fruits. Les principaux éléments nutritifs sont absorbés par les tomates dans les proportions moyennes suivantes : 370 kg d'azote, 50 kg de phosphore, 680 kg de potassium, 290 kg de magnésium et 45 kg de calcium à l'hectare.

En cours de croissance, le producteur devrait théoriquement appliquer deux fois plus de potassium que d'azote et presque autant de magnésium

que d'azote pour répondre aux besoins nutritionnels de la plante. Cette interprétation est toutefois un peu trop simple. En réalité, les programmes de fertilisation sont corrigés régulièrement tout au long de la période de végétation pour satisfaire les besoins nutritionnels de la plante, qui varient en fonction de l'état de la plante et des conditions environnementales. L'engrais utilisé sert également à régulariser la croissance de la plante et la qualité du fruit.

Le rôle de chaque élément nutritif dans la croissance et la productivité des tomates est décrit ci-après.

Azote

Cet élément nutritif est plus utile aux organes végétatifs de la plante (feuilles et tiges) qu'aux organes reproducteurs (fruits). Un taux élevé d'azote dans le sol provoque une grande activité végétative, au détriment de la production de fruits. Toutefois, par temps chaud et ensoleillé, le taux d'azote doit être augmenté pour permettre à la plante de poursuivre sa croissance et d'atteindre sa pleine capacité de production de fruits.

La plante qui absorbe trop d'azote se caractérise par une grosse tige robuste, des feuilles enroulées en haut de la plante, de grosses grappes et de grosses fleurs, ainsi que par une mauvaise fructification. Une carence en azote peut rendre les plantes dures et leur partie terminale ajourée. Leurs feuilles sont vert pâle et les fleurs, jaune pâle.

Potassium

Le potassium a une grande incidence sur la qualité du fruit et, à des taux élevés, il confère aux plantes une bonne résistance au froid. Il importe surtout d'appliquer les bons taux de potassium à la plantation pour régulariser la croissance et, plus tard, pour prévenir des troubles de mûrissement. Le rapport potassium–azote est aussi important pour régulariser la croissance, car plus le rapport est élevé, plus la croissance est lente. Les problèmes de qualité du fruit comme le mûrissement inégal, la mauvaise apparence et, dans une certaine mesure, la rentabilité de la culture sont associés à de faibles taux de potassium, et ils peuvent être corrigés dans la plupart des cas avec des engrais riches en potassium. Une bonne technique d'irrigation et le maintien d'une teneur constante en sel dans la solution du sol contribuent aussi à prévenir le mûrissement inégal.

Phosphore

Le phosphore est utilisé en quantité beaucoup moins grande que l'azote et le potassium, mais il en faut constamment dans le sol. Le phosphore joue d'abord un rôle important au début de la croissance des racines, surtout lorsque le sol est frais, et il contribue beaucoup à l'activité végétative et à la fructification dans l'ensemble de la culture. S'il y a carence en phosphore, les nervures et les tiges ont une couleur mauve caractéristique, une faible croissance et un mauvais développement des grappes. Il est rare d'observer

une toxicité causée par le phosphore. Cet élément s'entrepose bien dans le sol, mais il est facilement lessivé dans un milieu à base de tourbe. Il est donc absolument nécessaire de toujours inclure le phosphore dans les engrais utilisés pour la culture sur tourbe.

Magnésium

La carence en magnésium est fréquente, mais il est rare qu'elle entraîne une baisse de rendement. Elle peut toutefois favoriser l'apparition de la botrytis et d'autres maladies. En général, seule la plante souffre de carence, et non le sol, et cette carence est associée à des engrais riches en potassium ou à une mauvaise croissance des racines. Ces deux conditions nuisent à l'absorption d'une quantité suffisante de magnésium par la plante, qui est alors forcée d'utiliser le magnésium des vieilles feuilles pour alimenter les nouvelles. Comme le magnésium est une partie vitale de la chlorophylle, une carence est facilement détectable par l'absence de chlorophylle. La pulvérisation de sels d'Epsom dans une solution à 2 % parvient sans peine à rectifier une insuffisance de magnésium. Certains producteurs n'hésitent pas à effectuer des pulvérisations fréquentes si la culture a besoin de magnésium.

Calcium

Une carence en calcium se traduit généralement par la nécrose apicale du fruit et le dépérissement des bourgeons terminaux. Dans la plupart des cas, la carence en calcium n'est pas attribuable au sol, mais elle peut découler de plusieurs causes dont la plus probable serait l'incapacité de la plante à absorber suffisamment d'eau par suite d'un arrosage insuffisant ou non uniforme, de variations fréquentes ou considérables du degré d'humidité relative ou d'un taux élevé de sels. Des pulvérisations de nitrate de calcium ou de chlorure de calcium dans une solution à 2 % aident à rectifier cette carence, mais il est encore préférable de mieux équilibrer l'eau fournie à la plante.

Le calcium, le magnésium et le potassium se font probablement concurrence avec divers degrés de succès pour pénétrer dans les mêmes points d'absorption de la plante; il est bon de noter qu'une augmentation des doses d'un de ces éléments peut nuire à l'absorption des deux autres.

Soufre

Le soufre cause rarement de problème puisqu'il se trouve dans de nombreux engrais à titre d'élément porteur et qu'il constitue un polluant répandu. Toutefois, un taux élevé de soufre peut provoquer la formation de sels trop riches et nuire à l'assimilation du molybdène par les plantes.

Fer

La carence en fer est un problème fréquent qui provoque généralement une chlorose chez les jeunes feuilles. Comme dans le cas du calcium,

l'insuffisance de fer est surtout attribuable à d'autres causes que le sol. Parmi les causes indirectes, mentionnons un pH trop élevé, un taux de manganèse trop élevé, une mauvaise croissance des racines ou une anaérobie du sol découlant d'un arrosage excessif. On peut souvent régler ce problème en *aérant davantage le sol, en le laissant sécher ou en laissant* sécher la tourbe. Les applications sur le sol et les applications foliaires de sels ferreux ou de fer chélaté peuvent s'avérer utiles, mais la meilleure solution est encore d'éliminer la source du problème.

Manganèse

La carence en manganèse est souvent prise pour une carence en fer, et elle est fréquemment causée par la toxicité du fer. La toxicité du manganèse est un problème plus sérieux, et elle se manifeste lorsque l'étuvage n'est pas bien maîtrisé et n'est pas suivi d'un lessivage.

Cuivre

La tourbe est parfois pauvre en cuivre, mais l'usage répandu de tuyaux en cuivre assure la plupart du temps une quantité suffisante de cuivre.

Bore

Lorsqu'il y a une carence en bore, les feuilles sont fragiles, le flétrissement est prématuré et le dépérissement des bourgeons terminaux, prononcé. On peut facilement rectifier cette carence avec des applications foliaires d'une solution de Borax, mais l'application doit être bien mesurée, car la toxicité du bore peut causer de graves dommages aux plantes.

Zinc

Il est rare d'observer une carence en zinc. La toxicité peut constituer un problème dans les systèmes hydroponiques avec recirculation, car les tuyaux galvanisés libèrent toujours un certain taux de zinc.

Molybdène

Une carence en molybdène peut se manifester dans un sol acide ou lorsqu'il y a des taux de soufre élevés. Les symptômes de cette carence ne sont pas facilement reconnaissables, mais l'analyse du tissu des feuilles s'avère un bon moyen de diagnostic.

Chapitre 4 Pratiques culturales générales

Calendrier de culture

Tomates hâtives de printemps

- Semer entre le 25 octobre et le 25 novembre
- Repiquer dans un sol permanent entre le 1er et le 15 janvier
- Récolter entre avril et juillet
- Arracher les plants entre le 1er et le 20 juillet
- Stériliser le sol entre le 1er et le 25 juillet

Tomates d'automne

- Semer entre le 15 juin et le 15 juillet
- Repiquer dans un sol permanent entre le 20 juillet et le 15 août
- Récolter entre octobre et décembre
- Arracher les plants entre le 15 décembre et le 1er janvier
- Stériliser le sol entre le 16 décembre et le 1er janvier

La tomate hâtive de printemps est généralement remplacée par une tomate tardive de printemps dans les abris protégés par une paroi simple de plastique, où la transmission de la lumière se fait mal et le chauffage coûte cher.

Tomates tardives de printemps

- Semer entre le 15 décembre et le 15 janvier
- Repiquer dans un sol permanent entre le 1er février et le 1er mars
- Récolter entre mai et juillet
- Arracher les plants entre le 20 et le 25 juillet

Il arrive que la culture de tomates de printemps se prolonge jusqu'à novembre lorsque les plants sont sains. Pour varier le calendrier annuel habituel, qui consiste à produire une culture de tomates de printemps et une d'automne, on peut produire des concombres le printemps et à l'automne ou deux cultures de laitues à l'automne.

Sélection des cultivars

La première décision du producteur est de choisir un cultivar à fruits rouges ou un cultivar à fruits roses. Il fonde généralement cette décision sur les préférences des consommateurs, mais il peut également être influencé par les conditions de culture et par les types de cultivars offerts. Les cultivars à fruits rouges sont en général choisis plus souvent que ceux à fruits roses. Toutefois, il arrive souvent que l'on enregistre une pénurie de cultivars à fruits rouges qui sont résistants à la pourriture fusarienne des racines et du collet. Les agriculteurs canadiens utilisent les cultivars suivants qui sont homologués pour la vente.

Cultivars à fruits rouges

Hybride Michigan–Ohio

Ce cultivar produit des fruits de grosseur moyenne. Il est très vigoureux et parfois difficile à polliniser. L'hybride Michigan–Ohio n'est pas recommandé pour une production d'automne ou pour une production sous plastique, et il est sensible à la cladosporiose. Jadis très employé pour la culture, ce cultivar n'offre actuellement presque aucune valeur commerciale, même si la semence est encore vendue sur le marché.

Vendor

Les fruits de ce cultivar mûrissent uniformément. Ils sont petits, surtout parce que la fructification est rapide et que les grappes sont surchargées. On doit commencer à fertiliser le Vendor plus tôt que les autres cultivars proposés. Ce cultivar est recommandé pour une production de printemps ou une production d'automne sous verre, mais il présente un intérêt particulier comme culture rapide de printemps sous plastique. Il donne des fruits d'excellente qualité, même dans une serre où la température est un peu plus basse que la normale, mais sa culture est malheureusement limitée par sa sensibilité à la cladosporiose et par son manque de résistance au virus de la mosaïque de la tomate et à la pourriture fusarienne des racines et du collet.

Dombito

Il s'agit d'un cultivar vigoureux à gros fruits qui est très productif. Il résiste bien aux maladies en général, sauf à la pourriture fusarienne des racines et du collet.

Caruso

Ce cultivar à gros fruits n'est pas aussi vigoureux que le Dombito, mais sa production est aussi bonne sinon meilleure. Il résiste bien aux maladies en général, sauf pour ce qui est de la pourriture fusarienne des racines et du collet.

Le Dombito et le Caruso étaient les deux plus importants cultivars à fruits rouges au moment de la rédaction du présent rapport. On a récemment adopté et mis à l'essai de nouvelles variétés à fruits rouges qui sont résistantes à la pourriture fusarienne des racines et du collet, et les résultats sont assez positifs. Plusieurs producteurs de graines s'emploient à mettre au point de nouveaux cultivars, mais le cultivar Trend est déjà considérablement répandu sur le marché.

Cultivars à fruits roses

Ohio MR–13

Le fruit de ce cultivar mûrit uniformément, et sa taille varie de moyenne à grosse. Il résiste à la craquelure et nécessite une grande fertilisation après

que la fructification est bien établie. Le cultivar Ohio MR-13 est relativement peu touché par le mûrissement irrégulier, mais il est sensible à la cladosporiose et à la pourriture apicale. Il peut servir pour la production de printemps ou d'automne lorsque la cladosporiose est maîtrisée. Ce cultivar résiste à la mosaïque de la tomate. Il a déjà été cultivé à grande échelle en Ontario et en Ohio, mais on l'a considérablement mis de côté lorsque la pourriture fusarienne des racines et du collet s'est révélée un problème.

Ohio CR-6

Ce cultivar à gros fruits résiste à la pourriture fusarienne des racines et du collet. Il est très vigoureux, mais il faut bien surveiller sa nutrition et son milieu ambiant pour obtenir une bonne fructification. Les fruits qui poussent sur les premières grappes ont une forme mal définie. On améliore généralement la qualité du fruit en élevant la température de l'air et en appliquant une faible dose d'azote. L'Ohio CR-6 donne des fruits une semaine après la plupart des autres cultivars, car la première grappe se situe plus haut sur la tige principale.

KR-15 et KR-381

Ces deux cultivars très ressemblants résistent à la pourriture fusarienne des racines et du collet.

L'Ohio CR-6 était le plus important cultivar à fruits roses quelque temps avant la rédaction du présent rapport, mais les lignées KR ont fait l'objet d'essais exhaustifs et sont désormais plus en demande dans le commerce. Comme les travaux de recherche se poursuivent continuellement pour mettre au point et vérifier la valeur de nouveaux cultivars à fruits roses et à fruits rouges, il vaut mieux consulter le spécialiste en horticulture de la région pour obtenir ses recommandations sur les plus récents cultivars avant de commencer la culture.

Multiplication végétative

La plupart des serriculteurs canadiens produisent eux-mêmes leurs transplants. Cette pratique est recommandée puisqu'elle réduit les risques d'importer des maladies et des insectes nuisibles. Par contre, les pépiniéristes spécialisés d'autres pays utilisent la technologie moderne pour produire des transplants peu coûteux et de qualité supérieure qui constituent une source d'approvisionnement fiable pour les producteurs canadiens. La multiplication végétative est une étape extrêmement importante de la production légumière en serre. Le succès d'une culture dépend en grande partie de l'attention consacrée aux détails et des soins apportés à la conduite des jeunes plants. De plus, pour les productions hâtives de printemps, la multiplication végétative doit avoir lieu durant l'hiver lorsque l'éclairage naturel est limité. Afin d'exploiter au mieux la

lumière disponible, il faut surveiller attentivement les autres facteurs comme l'espacement, la température, l'irrigation et la nutrition. À l'heure actuelle, on utilise beaucoup l'éclairage artificiel pour favoriser la croissance des transplants lorsque le rayonnement naturel est réduit, et cette pratique permet d'améliorer sensiblement le rendement des cultures de printemps hâtives.

Calendrier de multiplication

Il faut établir la date du semis en fonction de la période de récolte souhaitée. On compte généralement 5 mois entre le semis et le début de la récolte d'une culture normale de printemps, mais seulement 4 mois pour une production normale d'automne. Une culture de printemps que l'on commencera à récolter au début d'avril doit être semée vers la fin de novembre. Ces dernières années, un nombre croissant de producteurs plantent une culture tardive de printemps sous plastique. Dans ce cas, le semis a lieu en janvier et la plantation sous abri a lieu en mars. On procède à la récolte en mai, juin, juillet et plus tard. La culture tardive de printemps est plus facile et moins coûteuse, mais la récolte s'effectue lorsque les prix sont relativement bas.

Semis

On compte environ 300 graines de tomate par gramme. Ainsi, pour obtenir une densité de 25 000 plants par hectare, un taux de germination de 80 % et une marge de sécurité supplémentaire de 10 %, il faut semer environ 120 grammes de graines de tomate par hectare.

Le mode de semis le plus répandu est le suivant : remplir une caissette de plastique de 27 sur 55 cm avec un mélange sans sol comme un mélange commercial de tourbe, et égaliser. Tasser uniformément le mélange avec une planchette de bois jusqu'à 1,5 cm du bord. Semer à la volée ou en lignes le plus uniformément possible, à raison de 500 à 600 graines par caissette. Recouvrir les graines d'environ 0,5 cm de mélange pour que l'enveloppe des graines se détache plus rapidement, réduisant ainsi le risque de transmission du virus de la mosaïque de la tomate et d'une déformation des feuilles germinales. Après le semis, recouvrir la caissette de vitre ou de papier pour retenir l'humidité; il n'est pas nécessaire d'arroser davantage avant la germination. Placer la caissette dans une petite serre ou dans une chambre à semis spéciale (aucun éclairage n'est requis à ce stade) où la température de jour et de nuit est de 24 °C, et la laisser à cet endroit jusqu'à ce que l'inspection quotidienne révèle l'apparition des plantules. Plus la température de l'air est élevée dans la chambre à semis pendant la germination, plus la germination est rapide et uniforme. Toutefois, comme la plantule croît rapidement à température élevée, il est risqué de faire germer les graines à haute température, car si on tarde de quelques heures à découvrir les caissettes, il peut en résulter une croissance excessive de la tige de la plantule et l'épuisement des hydrates de carbone. Lorsque la levée des plantules se déroule bien, découvrir les caissettes, baisser le thermostat à 20 °C jour et nuit, et fournir tout l'éclairage possible. Maintenir ces

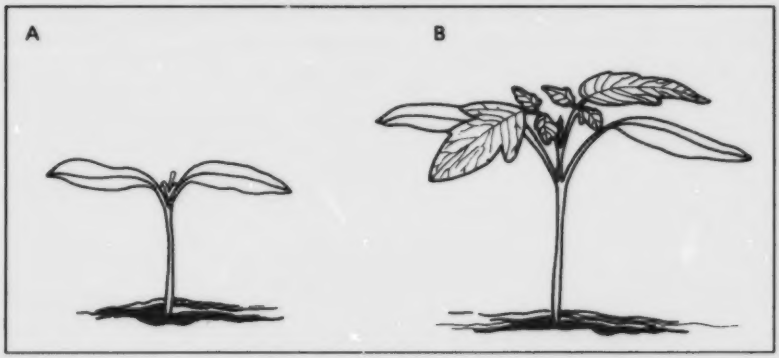

Fig. 11 Stades types de la croissance des plantules qui servent fréquemment de repère pour déterminer le meilleur moment d'amorcer (plante A) et de terminer (plante B) le traitement au froid.

conditions pendant 2 à 3 jours pour permettre à toutes les plantules de lever et d'entamer le processus de photosynthèse et pour prévenir la croissance excessive de la plantule.

Traitement au froid

Le traitement au froid consiste à placer les jeunes plantules à une température de 10 à 13 °C le jour et la nuit pendant environ 2 semaines, tout en leur procurant le plus d'éclairage possible pendant 9 à 12 heures par jour. Le traitement doit être appliqué juste après que les feuilles germinales (cotylédons) se sont déroulées et que les premières vraies feuilles sont apparues (fig. 11). À ce stade de croissance, les pousses gardées à basse température produisent quelques feuilles au-dessus de la première grappe, ce qui accélère la floraison; à basse température, les racines produisent des grappes ramifiées qui favorisent la présence de nombreuses fleurs sur la première grappe et peut-être aussi sur la deuxième grappe. Il est bon de garder la température fraîche le jour et la nuit, et le traitement au froid augmente le nombre de fleurs sans pour autant nuire à la fructification. Lorsque les conditions ultérieures pour la fructification sont bonnes, on obtient une plus grande quantité de fleurs reproductives puisque le nombre de boutons est plus élevé. Par contre, lorsque la température n'est pas très favorable à la fructification, la production et la germination du pollen ne se font pas normalement, ce qui entraîne une mauvaise fructification et l'apparition de la maladie appelée face-de-chat. Pour le traitement au froid, il vaut mieux semer de 10 à 14 jours plus tôt que d'habitude pour compenser la croissance ralentie durant le traitement. Le milieu de croissance dans les caissettes doit être stérile, car le risque de fonte des semis est plus grand lorsque la température ambiante est relativement basse.

Transplantation dans les pots (repiquage)

La meilleure période pour repiquer les jeunes plants de tomate, c'est à l'expansion des cotylédons, juste après le traitement au froid. Les jeunes

plants sont trop difficiles à manipuler avant ce stade, et si on tarde à repiquer, le choc de la transplantation est plus grand, car on risque de briser davantage de racines. Les transplants sont produits dans des pots de plastique de 7,5 à 10 cm ou dans des blocs de sol. Les bons terreaux et les mélanges de tourbe sont les milieux de croissance généralement les plus utilisés, mais les mélanges de tourbe doivent toujours être bien stérilisés. Les producteurs ne doivent pas modifier les mélanges recommandés, car les résultats pourraient s'avérer désastreux. Partout dans le monde, on tend de plus en plus à remplacer les mélanges à base de loam par des mélanges à base de tourbe, car il est difficile d'obtenir des loams de la qualité voulue. Toutefois, le sol de serre qui a une bonne texture et une bonne structure peut très bien convenir pour la production de transplants, à condition de bien le stériliser d'avance. De plus, il est fortement recommandé de faire un lessivage abondant après la stérilisation du sol. Ce traitement permet d'éliminer les sels excédentaires, qui peuvent nuire aux jeunes plants, et il a pour effet de diminuer les taux d'éléments nutritifs du milieu de croissance, particulièrement le taux d'azote. Les taux réduits d'éléments nutritifs permettent de mieux contrôler la croissance au moyen de la fertigation.

Il n'est pas bon de changer fréquemment le substrat utilisé pour la production de transplants, car les jeunes plants ne réagissent pas de la même façon dans divers substrats, et l'expérience acquise en utilisant un même substrat pendant des années n'est pas complètement transférable à d'autres substrats.

On pourrait croire que l'utilisation de grands pots (10 cm) augmentent le coût de production, mais il représente effectivement le meilleur choix puisque les producteurs peuvent conserver leurs plants plus longtemps dans la chambre de propagation, qui est beaucoup moins coûteuse à chauffer que la grande serre. De plus, une plus longue période de propagation permet d'utiliser davantage tout l'éclairage artificiel disponible. Enfin, les grands pots utilisés pour la production de transplants sont souvent associés aux meilleurs rendements obtenus pour les variétés hâtives. Les pots peuvent naturellement être réutilisés la saison suivante, mais il faut d'abord les laver et les faire tremper dans une solution javellisante (10 %) ou les désinfecter avec un autre produit approuvé.

Arrosage et nutrition

Il importe de bien arroser les jeunes plants immédiatement après le repiquage pour permettre au milieu de croissance d'acquérir la capacité au champ et pour fixer le sol autour des racines. L'arrosage doit être bien dosé pendant la période de propagation. Arroser généreusement les jeunes plants, mais pas trop car cela pourrait épuiser l'oxygène du milieu de croissance. Comme il est difficile de déterminer la teneur en humidité du sol dans un pot en plastique, on doit arracher régulièrement deux à trois plants et vérifier si le fond des pots est humide, mais non détrempé. Par beau temps, il faut arroser tous les jours les transplants cultivés dans les pots de 10 cm. Il peut s'avérer nécessaire d'arroser plus d'une fois par jour lorsque le temps est très ensoleillé, mais un arrosage à tous les trois jours

peut suffire lorsque le temps est sombre en hiver. Les plantes en petits pots ont besoin d'un arrosage plus fréquent. Une réduction délibérée de la quantité d'eau fournie aux plantes en pots, au stade de la propagation, ralentit la croissance et favorise la production de plants résistants, trapus et vert foncé. Toutefois, avec ce genre de contrôle de la croissance, on obtient invariablement des transplants trop endurcis, dont il est difficile de régulariser l'approvisionnement en eau, et ils accusent une baisse de rendement au début de la récolte lorsque les prix sont les meilleurs. Les recherches effectuées ces dernières années ont permis de désigner des moyens plus fiables pour maîtriser la croissance. De nos jours, la plante est nourrie sur une base continue et les éléments fertilisants nécessaires lui sont fournis à chaque arrosage; la concentration d'engrais dans la solution sert de régulateur pour déterminer la quantité d'eau assimilable par la plante (tableau 2). La concentration d'engrais recommandée que l'on doit mettre dans l'eau d'irrigation est mesurée en fonction de la conductivité électrique (CE) et varie d'après les conditions environnementales. Pour la production de transplants durant l'hiver, on a obtenu de bons résultats avec des solutions nutritives complètes dont la conductivité électrique variait de 3 000 à 6 000 µS/cm (tableau 3). On considère actuellement qu'une conductivité supérieure est préférable lorsque le rapport potassium/azote de la solution nutritive est supérieur à 4/1 (planche 1).

Tableau 2 Solutions-mères requises pour la préparation de solutions fertilisantes complètes ayant un rapport potassium/azote variable

Engrais (kg)	Rapport entre le potassium et l'azote		
	2:1	4:1	6:1
Solution A, 1 000 L			
Nitrate de calcium	67,0	70,0	70,0
Nitrate de potassium	74,0	9,5	9,5
Solution B, 1 000 L			
Sulfate de potassium	13,5	92,5	150,0
Solution C, 1 000 L			
Phosphate de monopotassium	22,5	22,0	22,0
Sulfate de magnésium	50,0	50,0	50,0
Chélate de fer (13 % de fer)	0,6	0,6	0,6
Mélange d'oligo-éléments (STEM)	0,8	0,8	0,8

- Les solutions-mères précitées peuvent servir, comme le montre le tableau 3, à fabriquer des solutions fertilisantes de conductivité électrique variée pour cultiver les transplants.
- Un mélange d'oligo-éléments type, par exemple le STEM (Soluble Trace Element Mix) de marque Peters, renferme 1,45 % de bore, 3,2 % de cuivre, 7,5 % de fer, 8,15 % de manganèse, 0,046 % de molybdène et 4,5 % de zinc.

Planche 1 Effet du rapport potassium/azote et de la conductivité électrique (µS/cm) de la solution fertilisante appliquée aux transplants de tomate. Remarquer l'excellente qualité des transplants obtenus lorsque la conductivité électrique de la solution nutritive est modérément élevée (de 3 000 à 6 000 µS) et que le rapport potassium/azote est également élevé (4/1 ou 6/1).

Tableau 3 Quantité (en litres) de chaque solution-mère requise pour produire 100 L de solution nutritive finale ayant une conductivité électrique variable

Conductivité électrique (µS/cm)	Rapport potassium/azote		
	2/1	4/1	6/1
1 000	0,375	0,375	0,275
3 000	1,450	1,450	0,875
6 000	3,350	3,150	2,400

L'éclairage artificiel permet aussi d'utiliser une conductivité électrique plus élevée que la normale, mais il ne faut pas appliquer cette mesure lorsque l'éclairage artificiel réchauffe trop les transplants et assèche l'atmosphère de la serre.

La concentration d'éléments nutritifs dans chaque solution finale varie en fonction de la conductivité électrique. Toutefois, comme on dilue généralement un litre de chaque solution mère dans 100 L d'eau (rapport de 1/100), la concentration d'éléments nutritifs correspond à celle indiquée au tableau 4.

On peut aussi produire des transplants d'aussi bonne qualité en utilisant aux taux appropriés des mélanges d'engrais commerciaux comme ceux communément désignés sous le nom de lanceur. Pour obtenir de façon simple et sécuritaire des transplants acceptables pour la plupart des producteurs, on peut alimenter la plante sans interruption avec une solution simple de fumure (3 gr de 10-52-10 par litre d'eau) ayant une conductivité électrique d'environ 4 000 µS/cm. Il est également possible d'obtenir des résultats acceptables avec une conductivité électrique d'au plus 5 000 µS/cm en utilisant des mélanges d'engrais commerciaux qui renferment tous les éléments nutritifs requis, sauf le calcium, et qui présentent un rapport potassium/azote d'environ 5/1.

Éclairage artificiel

Comme on l'a déjà mentionné, l'éclairage artificiel est d'abord utilisé tout de suite après la germination. Une installation relativement modeste est requise à ce stade, et il est possible d'obtenir une grande intensité lumineuse à peu de frais. Les lampes fluorescentes (utilisées de préférence avec des lampes à incandescence) et les lampes à vapeur de sodium à haute intensité de décharge (HID) peuvent convenir et sont grandement utilisées pour produire dans les chambres de croissance une intensité lumineuse minimale de 100 µmol/s par mètre carré, soit l'équivalent de 20 W/m^2 ou 8 000 Lux ou 760 fc. Les lampes fluorescentes produisent des plantes un peu plus courtes et d'un vert bleuâtre plus foncé que les lampes à vapeur de sodium HID, mais ces dernières sont les plus économiques à installer et à utiliser. Pendant quelques jours après le repiquage, lorsque les pots peuvent être placés tout près les uns des autres, il est encore économique de

Tableau 4 Concentration d'éléments nutritifs dans la solution nutritive finale*

Éléments nutritifs	Rapport potassium/azote		
	2/1	4/1	6/1
	ppm		
Azote, nitrate (NO_3^{2-})	193,00	113,00	113,00
Azote, ammonium (NH_4^+)	7,00	7,00	7,00
Phosphore	50,00	50,00	50,00
Potassium	400,00	480,00	720,00
Calcium	127,00	133,00	127,00
Magnésium	50,00	50,00	50,00
Fer	8,00	8,00	8,00
Zinc	0,07	0,07	0,07
Cuivre	0,07	0,07	0,07
Bore	0,30	0,30	0,30
Manganèse	2,00	2,00	2,00
Molybdène	0,05	0,05	0,05

* Les solutions décrites au tableau 2 sont diluées au moyen d'un injecteur d'engrais ayant un taux de dilution de 1/100.

maintenir une grande intensité lumineuse (de 75 à 100 µmol/s par mètre carré) durant environ 16 à 18 h par jour. Toutefois, à mesure que les plantes poussent, il faut les espacer progressivement pour éviter qu'elles soient trop entassées et qu'elles s'étiolent; l'utilisation d'une forte intensité lumineuse devient alors de moins en moins rentable. Pendant le reste du temps, lorsque les plantes se trouvent dans la salle de reproduction, il est bon d'assurer un éclairage supplémentaire (un éclairage artificiel en plus de l'éclairage naturel) dont l'intensité lumineuse est d'environ 50 µmol/s par mètre carré. Par contre, lorsque le coût importe peu, il vaut mieux utiliser la plus grande intensité lumineuse possible pendant un maximum de 18 h par jour, car ce traitement réduit la période de reproduction et produit des transplants plus lourds, plus forts et plus robustes. Il n'est pas avantageux d'utiliser une lampe à incandescence de faible intensité pour la culture des plants de tomate au milieu de l'hiver sous prétexte de prolonger la période d'éclairement naturel.

Maîtrise de la température

Le tableau 5 résume les températures recommandées pour la production de transplants et les températures déjà mentionnées pour la germination de la semence et pour le traitement au froid.

Tableau 5 Températures recommandées pour la production de transplants de tomates

Stade de croissance	Éclairement	Température de l'air en °C	
		Jour	Nuit
Germination de la graine	Sans importance	24	24
Durant les deux semaines suivant l'expansion du cotylédon (traitement au froid)	Intensité lumineuse maximale de 9 à 12 h par jour	10 à 13	10 à 13
Après le repiquage (plants en pot)	Bon éclairement	21*	18
Après le repiquage (plants en pot)	Mauvais éclairement	19	17*

* Les cultivars résistants au froid, comme le Vendor, peuvent tolérer de 1 à 2 °C de moins que les températures indiquées. Toutefois, les cultivars vigoureux, comme le Ohio CR-6, donneraient des fruits difformes et de mauvaise qualité avec une réduction de cet ordre.

Apport de gaz carbonique

Durant la multiplication végétale, l'atmosphère enrichie d'une concentration nominale de 1 000 vpm ($\simeq$ 1 000 ppm) de gaz carbonique augmente la vigueur des plantes et favorise la fructification précoce, et elle peut compenser partiellement un mauvais éclairage. Les effets bénéfiques d'un apport de gaz carbonique sont plus manifestes lorsque la température de l'air est élevée, et ils sont proportionnels à la durée de l'apport. Le gaz carbonique peut être appliqué durant le jour ou n'importe quand la nuit à la lumière artificielle. Comme la production de transplants n'exige qu'une petite surface, il est grandement préférable et pas trop onéreux d'utiliser le gaz carbonique liquéfié sous pression, en raison de sa pureté absolue et de la possibilité de bien régler les concentrations. De plus, en utilisant le gaz carbonique liquéfié, on risque moins d'endommager les plantes avec les gaz polluants qui se dégagent lorsqu'on brûle du gaz naturel ou du propane pour obtenir le gaz carbonique.

Greffage

Le greffage est une technique recommandée lorsque la stérilisation du sol n'est pas possible ou que l'on ne peut enrayer par étuvage du sol certaines maladies comme la pourriture fusarienne des racines et du collet. On peut utiliser comme porte-greffes des espèces sauvages étroitement apparentées à la tomate, ou même des cultivars de tomate qui sont résistants à un certain nombre de maladies. Les porte-greffes actuellement

sur le marché sont résistants à la maladie des racines liégeuses, à la flétrissure fusarienne, à la flétrissure verticillienne, au nématode cécidogène et à la pourriture fusarienne des racines et du collet. La figure 12 expose diverses méthodes de greffage appropriées pour les tomates.

Tout greffage exige un instrument bien tranchant et une surface propre, afin de ne pas contaminer les entailles avec le sol; l'instrument idéal est une lame de rasoir ou un scalpel. Le greffage de type A est le plus rapide à faire, mais il ralentit le plus la croissance du transplant. Le greffage de type B est également une technique rapide qui donne une soudure stable, mais il peut provoquer un certain arrêt de croissance du transplant. Le greffage de type C est le plus lent, mais il donne généralement les meilleurs résultats.

Comme la graine du porte-greffe germe lentement et inégalement, il vaut mieux la semer avant celle du cultivar du greffon afin que le porte-greffe et le greffon soient de même taille et aient une tige de même grosseur au moment du greffage.

Lorsque la flétrissure fusarienne et la flétrissure verticilienne sont au nombre des maladies qu'il faut prévenir, on doit enlever le système radiculaire du greffon en taillant la tige du cultivar au-dessous du point de contact de la greffe. Pour éviter le dessèchement des plantes greffées, la taille de la tige du greffon doit être progressive et répartie sur une semaine; il peut s'avérer nécessaire d'arroser la plante avec un atomiseur pendant cette période pour favoriser la reprise.

Le greffage est très utile pour éliminer les coûts de stérilisation du sol et pour obtenir des cultivars productifs, mais dépourvus de toute résistance aux maladies, cependant il soulève également des problèmes. En effet, le point de greffe constitue un obstacle naturel à la libre circulation de l'eau et des éléments nutritifs entre les racines et la partie supérieure de la plante, ainsi que la libre circulation des pigments assimilateurs entre la partie supérieure de la plante et les racines. Pour cette raison, avec le greffage, il n'est pas toujours possible d'obtenir un rendement maximum.

Le greffage exige aussi une main-d'œuvre qualifiée qui est coûteuse ou pas toujours facile à trouver. La différence entre la vigueur du greffon et celle du porte-greffe peut se traduire par de bons écarts dans le diamètre des tiges (un minimum de 3 mm est souhaitable), et une tige trop petite ralentit la vitesse de reprise de la greffe et réduit le taux de réussite.

Enfin, la manipulation répétée des plants lors du greffage peut favoriser la propagation de la mosaïque du tabac. Il est donc très important de nettoyer régulièrement le greffoir et de se laver souvent les mains avec du lait pendant le greffage. Toutes les mesures qui visent à éliminer le virus de la mosaïque du tabac sont toujours de rigueur, à commencer par l'utilisation de semence traitée à la chaleur.

Espacement des plants

On convient généralement que l'espace optimal occupé par chaque plante doit mesurer de 35 à 40 cm^2. Il est souhaitable d'avoir une distance égale entre les rangs et entre les plantes sur le rang. Toutefois, on peut disposer

les plants en rangs doubles pour faciliter les opérations culturales. Pour ce faire, on plante les deux premiers rangs à 80 cm d'écart, on laisse un passage de 1,2 m et on plante deux autres rangs également espacés de 80 cm; le processus est répété au besoin. Les plants sur le rang sont espacés de 35 à 40 cm. La distance entre les plants peut être réduite lorsque l'éclairage est favorable, comme c'est le cas pour la production tardive printannière et la production automnale. Il importe d'utiliser au mieux tout l'espace disponible dans la serre, mais une trop grande densité de plantation réduit la grosseur des fruits et favorise l'apparition de maladies foliaires.

Taille et tuteurage

Les cultivars modernes de tomates de serre conservent la tige grêle caractéristique de leurs ancêtres qui poussent à l'état sauvage, et il faut donc leur fournir un support lorsqu'ils poussent sur une seule tige verticale.

Tailler les plants de tomates de serre à une seule tige, et supprimer tous les bourgeons latéraux et les gourmands au moins une fois par semaine. Utiliser du fil de plastique pour supporter les plants. Attacher sans serrer un bout du fil au pied du plant et l'autre bout à une broche parallèle aux rangs placée de 1,8 à 2,5 m au-dessus du rang. À mesure que la plante pousse, on l'enroule autour du fil en pratiquant une ou deux rotations pour chaque grappe de fruits. Utiliser des attaches en spirales ou des attaches à pression en plastique pour retenir le plant au fil lorsqu'il grossit et qu'il porte beaucoup de fruits. Pour la culture de printemps, utiliser 1,5 à 2 m de fil de plus pour attacher le plant à la broche parallèle. À mesure que le plant progresse vers la broche, on détache et on relâche ce fil de réserve pour descendre le plant et laisser sa partie inférieure reposer sur le sol. Six à sept semaines environ avant la fin de la récolte, enlever le bourgeon terminal en le pinçant ou en le coupant.

Il n'est pas établi que le défeuillage du bas de la plante est toujours nécessaire pour améliorer la circulation de l'air. Toutefois, on supprime généralement les feuilles du bas avant que le plant ne s'affaisse en atteignant la broche surplombante. Il arrive que plus d'une grappe se trouve exposée lorsqu'on supprime une partie du feuillage et que les broches surplombantes sont peu élevées (à moins de 2 m du sol), et l'on ne sait pas dans quelle mesure cette pratique peut nuire au rendement. En général, la longueur minimale recommandée pour une tige qui porte des feuilles est de 1,2 m. Ce problème peut être évité dans les nouvelles serres en fixant la broche de soutien plus haut que 2 m.

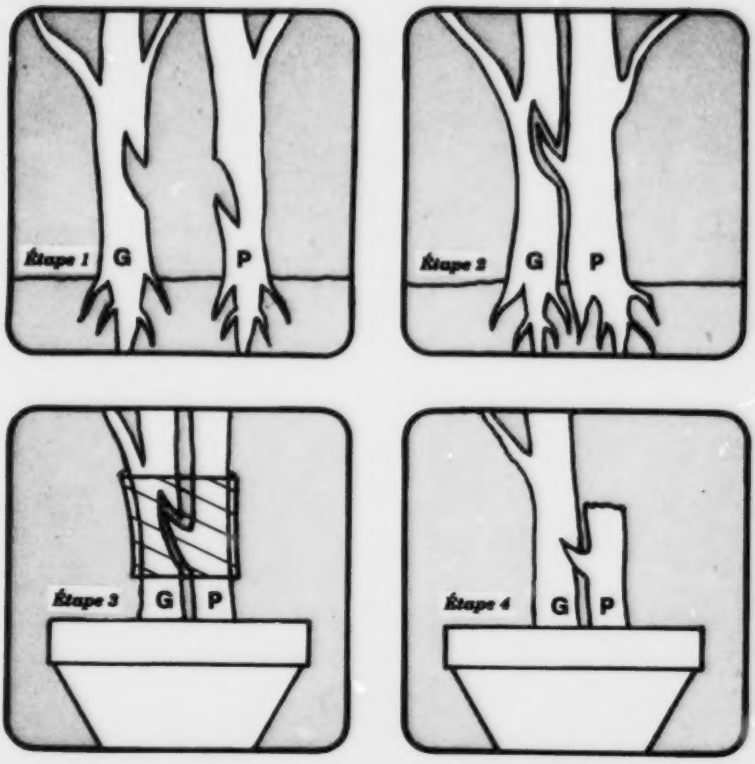

Fig. 12 Types de greffe pour les tomates; P, porte-greffe; G, greffon (*suite*).

Type A Plants à racines nues (greffe sur banquette).

Première étape
Choisir un porte-greffe et un greffon de même taille. Faire une entaille ascendante dans la tige de l'un et une entaille descendante dans la tige de l'autre.

Deuxième étape
Mettre en contact les deux tiges et les retenir ensemble par les languettes de tissu.

Troisième étape
Attacher les deux plantes ensemble avec du ruban adhésif et les planter dans un pot en prenant soin de garder le point de greffe bien au-dessus du niveau du sol.

Quatrième étape
Éliminer le haut du porte-greffe et enlever le ruban adhésif lorsque le point de greffe est cicatrisé.

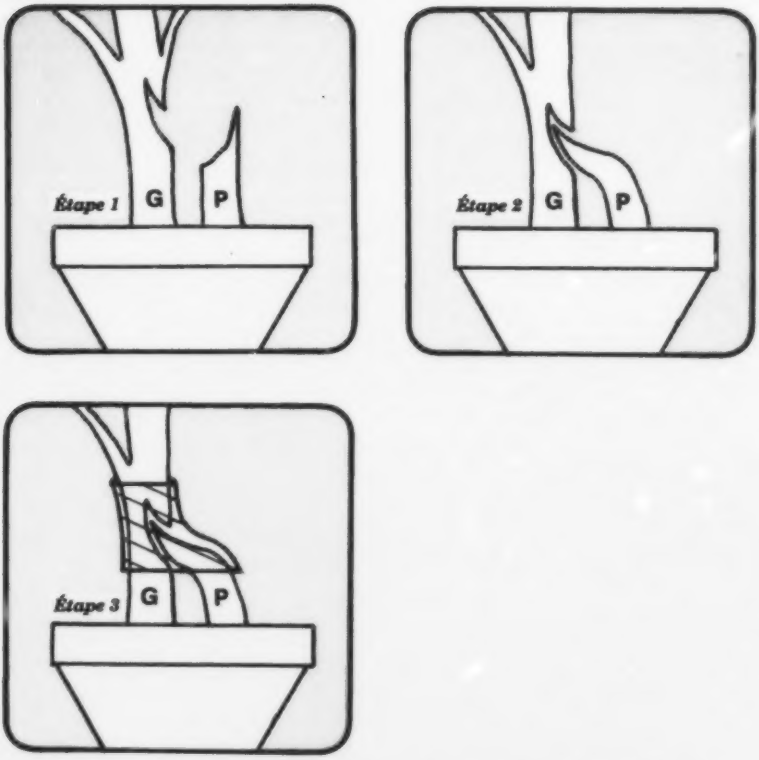

Fig. 12 Types de greffe pour les tomates; P, porte-greffe; G, greffon (*suite*).

Type B Porte-greffe et greffon cultivés dans le même pot (le haut du porte-greffe est éliminé avant le greffage).

Première étape
Faire une incision ascendante dans le greffon et éliminer le haut du porte-greffe en le taillant en diagonale.

Deuxième étape
Emboiter le haut de la tige du porte-greffe dans l'incision pratiquée sur la tige du greffon.

Troisième étape
Enlever les feuilles nuisibles et lier ensemble les deux plantes avec du ruban adhésif.

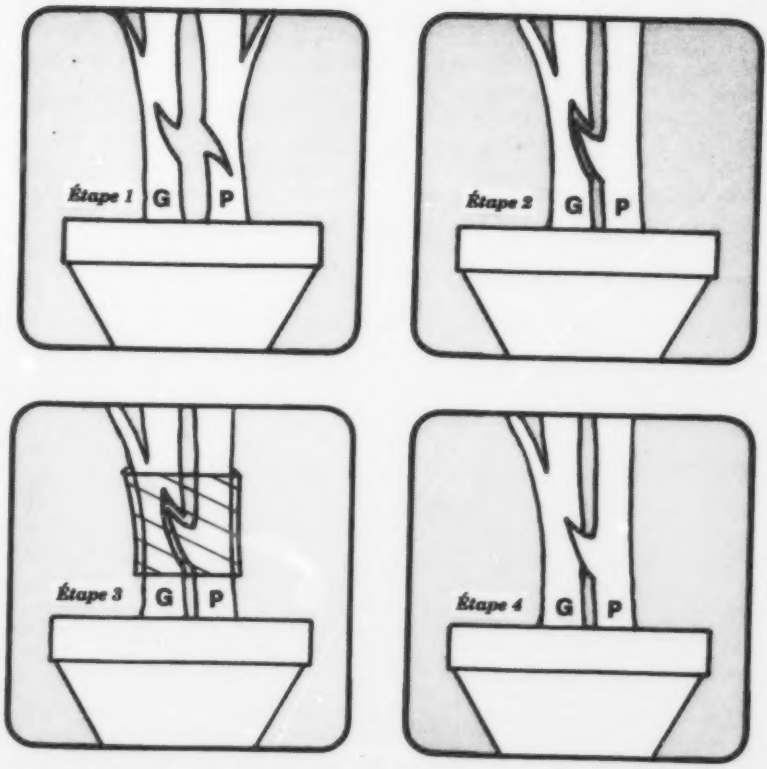

Fig. 12 Types de greffe pour les tomates; P, porte-greffe; G, greffon (*fin*).

Type C Porte-greffe et greffon cultivés ensemble dans le même pot (le haut du porte-greffe est éliminé lorsque le point de greffe est cicatrisé).

Première étape
Planter le greffon et le porte-greffe à 10 mm de distance dans le même pot et les laisser pousser jusqu'à ce qu'ils soient prêts pour la greffe. Pratiquer une incision ascendante dans le greffon et une incision descendante dans le porte-greffe.

Deuxième étape
Mettre les deux tiges en contact et les retenir ensemble par les languettes de tissus.

Troisième étape
Attacher les deux plantes ensemble avec du ruban adhésif.

Quatrième étape
Éliminer le haut du porte-greffe et enlever le ruban adhésif lorsque le point de greffe est cicatrisé.

Pollinisation et édrageonnage

Après l'apparition du bouton floral, il reste quatre étapes à franchir pour obtenir une bonne fructification : les anthères produisent un pollen viable; elles libèrent le pollen qui se rend aux stigmates; les grains de pollen germent sur les stigmates; les tubes polliniques s'inclinent vers les stigmates et fécondent les ovules dans l'ovaire de la fleur de tomate. Les mauvaises conditions de température, d'éclairage et de nutrition peuvent nuire à ce processus et réduire la fructification et la qualité du fruit. La température de l'air pendant le jour joue indiscutablement un rôle important dans la fructification, et elle ne doit pas descendre au-dessous de 18 °C après le début de la floraison. Les autres causes possibles d'une mauvaise fructification sont la croissance excessive, un mauvais éclairage, une mauvaise nutrition et tout autre stress pour la plante. Pendant l'automne et l'hiver et au début du printemps, les fleurs de la plupart des cultivars sont de forme un peu différente, ce qui nuit à la pollinisation naturelle. Cette modification de la forme serait causée par une baisse de température durant la nuit, et la situation serait occasionnellement aggravée par la présence d'une grande quantité d'azote assimilable. Pour favoriser la pollinisation, utiliser au moins tous les deux jours un vibrateur électrique pour secouer les grappes dont les fleurs sont ouvertes, de préférence entre 11 h et 15 h lorsque les fleurs sont modérément sèches et que le pollen se répand. Pour remplacer l'utilisation du vibrateur électrique, qui exige beaucoup de main-d'œuvre, on a expérimenté la vibration manuelle du support des plantes et l'emploi d'un gros jet d'eau, sans toutefois obtenir des résultats satisfaisants. On a aussi pratiqué des pulvérisations d'hormones lorsqu'il n'y a pas de pollinisation, mais la qualité des fruits n'était pas acceptable pour les marchés nord-américains. Les résultats obtenus récemment avec des bourdons ont été assez bons pour la pollinisation des fleurs de tomate. Les bourdons sont disponibles dans le commerce, et ceux qui les ont utilisés ont été satisfaits. Si la pollinisation est mauvaise, les fruits peuvent être de qualité inférieure; ce problème est causé par le développement incorrect et irrégulier des graines à l'intérieur des fruits, qui présentent alors des creux et des déformations.

Un trop grand nombre de fruits sur le plant cause parfois des problèmes. Pour ne pas épuiser le plant et obtenir de plus gros fruits, il est bon de limiter le nombre de fleurs par grappe au moyen d'une technique d'édrageonnage récemment mise au point. Cette technique est très délicate et doit être utilisée avec beaucoup de précaution. L'édrageonnage consiste à laisser trois fruits vendables sur les deux premières grappes et quatre fruits sur les autres grappes. Toutefois, le nombre optimal de fruits par grappe peut varier selon le cultivar utilisé et, surtout, d'après les conditions de croissance. Il est sûr que l'on obtient toujours de gros fruits qui se vendent au meilleur prix lorsqu'on limite le nombre de fruits par grappe, mais le producteur court toujours le risque de sous-estimer le potentiel de la culture ou de ne pas prévoir les effets du beau temps, et il procède à un édrageonnage trop prononcé qui limite inutilement la production. Le producteur d'expérience peut certainement tirer le meilleur parti de l'édrageonnage, car il est apte à utiliser cette technique pour maximiser les

recettes. Les drageons doivent naturellement être supprimés le plus tôt possible, avant qu'ils soient trop gros.

Récolte et entreposage

Après avoir investi tant d'efforts et d'argent dans la production, il faut absolument manipuler le fruit avec soin pendant la récolte et le transport au marché.

La plupart des producteurs récoltent les tomates deux à trois fois par semaine lorsqu'il fait chaud. Les fruits doivent être placés délicatement dans des contenants rigides et coussinés pour ne pas les meurtrir et les endommager. La couleur des fruits doit être la plus uniforme possible, afin d'accélérer le classement dans la salle d'emballage et pour uniformiser le traitement de tous les fruits entreposés. Il est essentiel de prendre toutes les précautions voulues pour éviter que les fruits soient endommagés au cours du transport.

La maturité du fruit à la récolte est un facteur très important. En effet, on risque plus d'endommager un fruit récolté avant qu'il ait atteint sa pleine maturité, car il n'a pas formé entièrement sa couche de protection cireuse. Le calice est parfois laissé sur la tomate pour indiquer qu'il s'agit d'un produit de serre. Il faut donc bien s'assurer que le calice ne perfore pas le fruit. Entasser les fruits dans des caisses trop remplies ou les empiler trop haut peut endommager les fruits placés au fond.

On récolte les tomates en début de matinée, lorsque le temps est frais et que la température des fruits n'est pas trop élevée. Les tomates doivent être protégées de la lumière directe du soleil et placées dans des endroits frais, sombres et bien aérés tout de suite après la récolte, afin de prévenir une hausse de la température interne des fruits.

La benne utilisée pour le transport jusqu'au lieu d'emballage doit être recouverte pour protéger les fruits contre la lumière directe du soleil et empêcher que l'air ne les assèche. Les chargements de tomates ne doivent pas être exposés longtemps à la lumière directe du soleil. Il faut éviter l'accumulation de chaleur pendant le transport et placer immédiatement les tomates dans une chambre frigorifique (12 °C) lorsqu'on arrive à destination. Ne pas disposer les caisses en piles trop hautes et trop compactes, afin que les tomates qui se trouvent dans les caisses au centre des piles puissent refroidir correctement.

Le mûrissement peut être accéléré lorsque les tomates sont emballées et entreposées au même endroit qu'un produit qui dégage beaucoup d'éthylène comme la pomme, et l'on risque alors d'obtenir un fruit trop mûr. Lorsqu'on sort les tomates de la chambre frigorifique, il faut éviter que l'eau se condense dessus. À cette fin, on assèche l'air ambiant en actionnant le système de ventilation ou en élevant graduellement la température de la pièce avant de sortir les fruits. **Une fois que le fruit est cueilli, il est possible de préserver sa qualité, mais non de l'améliorer.**

Chapitre 5 Culture classique sur sol

La culture classique sur sol est le système le plus simple, et il implique la plantation et la conduite d'une culture comme on le ferait à l'extérieur. La plantation même constitue une étape importante de la croissance de la plante. Creuser d'abord une tranchée d'au moins 10 cm de profondeur et 15 cm de largeur; y placer les plants sans dégager les racines des blocs de sol ou des pots de tourbe dans lesquels ils ont poussé, et arroser chaque plant avec 25 mL de solution fertilisante (5 g de 10-52-17 par litre d'eau); ramener seulement un peu de sol autour du plant. Arroser le pied des plants au besoin pendant les 2 premières semaines. Une fois que les plants sont bien établis, on peut habituellement attendre de 4 à 6 semaines avant de faire un arrosage général, compte tenu du type de sol et de l'intensité lumineuse. L'irrigation générale est pratiquée plus tôt dans les sols légers que dans les sols lourds.

Types de sol recommandés

Pour atteindre leur pleine capacité de production, les légumes cultivés en serre exigent généralement un sol bien aéré, riche en éléments nutritifs, exempt d'agents pathogènes et ayant une bonne capacité de rétention d'eau. La culture des tomates en serre peut être faite dans divers sols, mais les meilleurs sont les loams, les loams sableux et les loams limoneux, et ils doivent tous être riches en matières organiques dans la mesure du possible (fig. 8). Il est possible d'utiliser d'autres types de sol, mais leur entretien est plus difficile et onéreux. Par exemple, les sols constitués de sable grossier ont une faible capacité de rétention de l'eau et des éléments nutritifs, et ils rendent difficile la formation de cônes lorsqu'on utilise un système d'irrigation goutte-à-goutte; les sols limoneux possèdent une structure instable qui se désagrège lorsque l'arrosage est abondant; enfin, les loams argileux sont mal drainés et difficiles à lessiver et, lorsqu'ils sont humides, leur structure résiste mal aux façons culturales. Un bon aménagement peut rendre presque tous les types de sols convenables pour la serriculture. Par exemple, l'addition de matières organiques peut améliorer les sols lourds et les sols légers. Lorsque le drainage naturel se fait mal, comme dans la plupart des argiles, des argiles limoneuses et des loams argileux–sableux, il convient d'installer un système de drainage par canalisations. Le principal rôle du sol est de fournir un milieu de culture renfermant les bonnes proportions d'air, d'eau et d'éléments nutritifs. Lorsque cet équilibre est atteint, les racines absorbent facilement l'eau et les éléments nutritifs nécessaires pour favoriser une croissance rapide.

Drainage

Installer des drains dans les couches de sol pour assurer l'évacuation de tout surplus d'eau. Utiliser des drains en argile perforés ou non perforés de 10 cm de diamètre, et laisser un petit espace entre eux pour tenir compte de

l'expansion; quelques drains de 7,5 cm peuvent convenir comme joint de raccordement pour les drains de 10 cm. Afin d'améliorer l'efficacité du drainage, recouvrir les lignes de drain avec des nattes en fibre de verre fabriquées à cette fin ou avec 2 cm de gravier. Installer les drains à une profondeur suffisante pour qu'ils ne soient pas endommagés par le motoculteur ou d'autres instruments aratoires. Espacer les lignes de drain de 45 cm, et les installer à une profondeur de 35 cm avec une déclinaison de 10 cm à tous les 150 m lorsque la ligne est constituée de drains en argile de 10 cm. On utilise également ces mêmes drains perforés dans le bas ou sur les côtés pour stériliser le sol à la vapeur. Relier les extrémités des lignes de drain adjacentes avec des coudes et des raccords en T, afin d'obtenir un étuvage uniforme d'une ligne à l'autre. Introduire la vapeur dans les rangées de drains par l'entremise d'un collecteur. Ce collecteur est muni à chaque extrémité d'un tuyau vertical de 50 cm pour permettre l'admission de la vapeur; il couvre la largeur de la pièce et est muni de raccords mesurant environ 25 cm de longueur et 2 à 3 cm de diamètre, et chacun de ces raccords est fixé à la ligne de drain à laquelle il correspond. Le collecteur et les lignes de drain ne doivent pas mesurer plus de 15 m, sinon la vapeur se condense en eau et la stérilisation n'est pas complète.

Irrigation par inondation et lessivage

Pour réaliser une très bonne stérilisation à la vapeur, il faut d'abord travailler le sol et amener sa teneur en eau au point de capacité du champ. La quantité d'eau requise à cette fin dépend de l'humidité du sol et du type de sol, mais elle s'établit généralement entre 20 et 50 L/m^2.

La stérilisation à la vapeur, surtout l'étuvage, libère souvent de l'ammonium et du manganèse en quantités toxiques. Elle peut aussi accroître les taux d'autres éléments comme le potassium, le fer et le zinc. Le lessivage du sol sert habituellement à éliminer les excès de ces substances et d'autres sels solubles et à refroidir le sol après la stérilisation à la vapeur. Lorsqu'une analyse du sol révèle la présence de quantités anormales de sels solubles dans le milieu d'enracinement, la quantité d'eau utilisée pour le lessivage doit être beaucoup plus considérable, et le tableau 6 peut servir de guide à cet effet.

Matière organique

Un taux élevé de matière organique contribue à stabiliser la structure du sol et améliore la capacité de rétention d'eau du sol. Les producteurs avaient jadis l'habitude de stériliser les sols de serre à la vapeur et d'incorporer un fumier bien décomposé après la stérilisation. Cette méthode réduisait les quantités d'ammoniaque et d'autres substances toxiques libérées, et elle contribuait aussi à réinoculer le sol avec des organismes utiles. Par contre, on risquait toujours d'introduire dans le sol des organismes pathogènes et des graines de mauvaises herbes. L'emploi de fumier ou de terre noire comme source de matière organique peut également contaminer le sol de la serre avec des résidus d'herbicides.

Tableau 6 Besoins de lessivage après l'étuvage

Conductivité électrique (µS/cm)		Quantité d'eau requise (L/m²)	
Méthode des extraits saturée	1/2 Extrait d'eau	Sols sableux	Autres sols
Jusqu'à 1,5	Jusqu'à 1,5	15	25
De 1,5 à 3,0	De 0,5 à 1,0	30	50
De 3,0 à 5,0	De 1,0 à 1,5	70	100
Plus de 5	Plus de 1,5	100	150

- Les nombres suggérés de litres d'eau requis par mètre carré indiquent également les taux équivalents de pluie en millimètres.
- Les taux indiqués s'appliquent au lessivage du sol et sont ajoutés à la quantité d'eau nécessaire au sol pour que le champ donne son plein rendement (de 20 à 50 L/m² habituellement).
- Les taux correspondent à une aspersion avec un système superposé, à des intervalles de 2 à 5 jours.
- Il est difficile de lessiver les sels de sols lourds, particulièrement lorsqu'on ne tente pas d'améliorer leur structure.
- Lorsque la conductivité avant le lessivage est plus élevée que le niveau recommandé, on doit la vérifier de nouveau après le lessivage et avant le semis.
- L'irrigation par inondation diminue sensiblement la conductivité et les réserves de nitrate et elle peut réduire un peu les réserves de potassium, mais elle a peu d'effet sur les taux des autres éléments nutritifs.

La quantité de fumier recommandée variait de 45 à 225 t/ha, compte tenu du genre de fumier et de l'état du sol. Par exemple, le compost usé ayant servi à la culture des champignons est riche en éléments nutritifs et peut causer des problèmes de conductivité dans le sol, tandis que la paille non décomposée peut provoquer une carence en azote.

Ces dernières années, l'addition de matière organique est de plus en plus considérée comme un moyen d'améliorer la structure du sol, et non plus comme un moyen d'augmenter la teneur du sol en éléments nutritifs. En fait, la teneur en éléments nutritifs de la plupart des fumiers et d'autres sources non standardisées de matières organiques est considérée comme un désavantage plutôt que comme un avantage, car ils sont de qualité très variable et les effets sur les plantes des divers éléments qu'ils contiennent sont imprévisibles. À l'heure actuelle, la tourbe à texture grossière constitue la meilleure source de matière organique. Cette tourbe est acide, car son pH est d'environ 4, et elle présente donc l'avantage supplémentaire d'abaisser le pH des sols calcaires; pour les sols non calcaires, on ajoute de la chaux en poudre à la tourbe meuble à raison de 5 kg/m³ environ pour neutraliser l'acidité de la tourbe. Lorsqu'on l'utilise pour améliorer l'état du sol, par exemple dans les nouveaux lieux de culture, il faut appliquer la tourbe en quantité abondante jusqu'à concurrence de 500 m³/ha. On réduit la quantité après avoir obtenu les conditions de sol souhaitables, mais il faut répéter annuellement les applications parce que la matière organique

du sol se décompose rapidement dans une culture sous verre. La quantité annuelle recommandée est de 100 m^3 de tourbe meuble par hectare.

On doit épandre à la volée la chaux et la tourbe avant le labourage, et les incorporer ensuite dans la couche de 30 cm à la surface du sol.

Maîtrise du pH

Les légumes de serre poussent généralement très bien dans les sols dont le pH varie de 5,5 à 7,5, mais il est généralement établi que le pH optimal est de 6 à 6,5 pour les sols minéraux et de 5 à 5,5 pour les sols organiques. On corrige un pH trop bas par l'addition de chaux calcique en poudre et, lorsque le taux de magnésium est trop bas, on le relève à un niveau acceptable en ajoutant une quantité égale de chaux dolomitique. Le tableau 7 doit seulement servir de guide à cet effet, car il vaut mieux se fier aux résultats d'une analyse du sol en laboratoire pour évaluer la quantité réelle de chaux nécessaire. Lorsque le pH est trop élevé, comme c'est habituellement le cas pour les sols minéraux utilisés en serre, on doit faire en sorte de le réduire au niveau optimal pour cette catégorie de sol (de 6 à 6,5).

Tableau 7 Besoins en chaux pour amener le pH du sol à 6,5 (en tonnes par hectare)

pH du sol	Loam sableux	Loam, loam limoneux	Loam argileux Sols organiques
6,0	3,0	4,5	6,0
5,5	6,0	9,0	12,0
5,0	9,0	12,0	18,0
4,5	12,0	15,0	24,0
4,0	15,0	18,0	30,0

Note : Les quantités de chaux suggérées s'appliquent aux 15 premiers cm de la surface du sol. S'il faut corriger l'acidité à une plus grande profondeur, on augmente les quantités en conséquence.

Une mesure simple, mais temporaire, d'abaisser un pH élevé est d'ajouter de la tourbe au sol sans neutraliser son acidité avec de la chaux. La tourbe contribue aussi à préserver une bonne structure du sol, mais il faut en ajouter tous les ans pour compenser les pertes causées par la décomposition. Lorsque le sol a besoin de calcium supplémentaire, on peut lui en fournir sous forme de sulfate de calcium (gypse), qui ne modifie pas le pH, ou sous forme soluble à chaque irrigation. Une solution à long terme pour un pH élevé est l'addition de soufre élémentaire. Il est impossible de recommander avec précision la quantité de soufre qui doit être appliquée, car il faut tenir compte du pouvoir tampon (échange cationique) et du pH

original du sol, deux facteurs qui varient d'un sol à l'autre. L'application de soufre en fleur est généralement de l'ordre de 50 à 500 kg/ha. En théorie, 320 kg de soufre en fleur peut neutraliser 1 000 kg de chaux, mais ce calcul est fondé sur l'hypothèse que tout le soufre se convertit instantanément en acide sulfurique. Toutefois, la conversion du soufre en acide sulfurique est réalisée avec le temps par les micro-organismes du sol (*Thiobacillus*), et elle est plus rapide dans les sols humides, chauds et convenablement aérés. Il convient donc d'épandre à la volée et de bien mélanger le soufre broyé ordinaire à la couche de 15 à 30 cm à la surface du sol plusieurs semaines avant la plantation de la culture, car la réaction du produit peut être lente à démarrer dans les sols froids.

Le sulfate de fer peut également servir pour l'acidification des sols. Il s'agit d'un sel qui libère de l'acide sulfurique lorsqu'il est soumis à l'hydrolyse, réduisant ainsi considérablement le pH et libérant une partie du fer qui se trouve dans le sol. On ajoute en même temps une certaine quantité de fer soluble et assimilable par les plantes. Toutefois, à poids égal, le sulfate de fer est quatre à cinq fois moins efficace que le soufre, et il est généralement plus coûteux. L'acide sulfurique peut être appliqué directement sur le sol, mais ce produit est dangereux et désagréable à manipuler, en plus d'exiger l'emploi de matériel à l'épreuve de l'acide. Dans certaines régions, on peut faire appel à des fournisseurs qui possèdent le matériel nécessaire pour appliquer ce produit. L'acide sulfurique présente l'avantage de réagir rapidement dans le sol.

Il peut s'avérer bénéfique dans la plupart des cas d'acidifier seulement la zone située près des racines, et la quantité de produits chimiques nécessaire est alors beaucoup moins considérable. Cette mesure est particulièrement recommandée avec un système d'irrigation goutte-à-goutte, car les racines occupent alors une surface restreinte et bien délimitée. L'utilisation d'injecteurs d'engrais et d'autres appareils pour incorporer au sol de l'acide nitrique ou phosphorique, dilué correctement pour plus de commodité et de sécurité, peut s'avérer un bon moyen de réduire le pH du sol près des plantes; ces acides préviennent aussi la précipitation des sels et le colmatage des lignes d'irrigation, et ils produisent de nouveaux éléments nutritifs qui sont utiles aux plantes. Pour déterminer le taux d'acide qu'il faut injecter, on ajoute graduellement à un volume d'eau connu une certaine quantité d'acide jusqu'à ce qu'on obtienne le pH souhaitable. Une autre méthode consiste à injecter de petites quantités d'acide dans la ligne d'irrigation tout en vérifiant le pH au moyen d'un pH mètre installé sur la ligne, et à augmenter graduellement la quantité d'acide jusqu'à ce qu'on obtienne le pH de l'eau souhaitable. Quand les autres conditions le permettent, on doit choisir les engrais appliqués régulièrement en fonction de leur aptitude à réduire ou à augmenter le pH du sol pour répondre à des besoins particuliers. Par exemple, le sulfate d'ammonium et le phosphate d'ammonium réduisent normalement le pH du sol, tandis que le nitrate de calcium aurait tendance à l'augmenter.

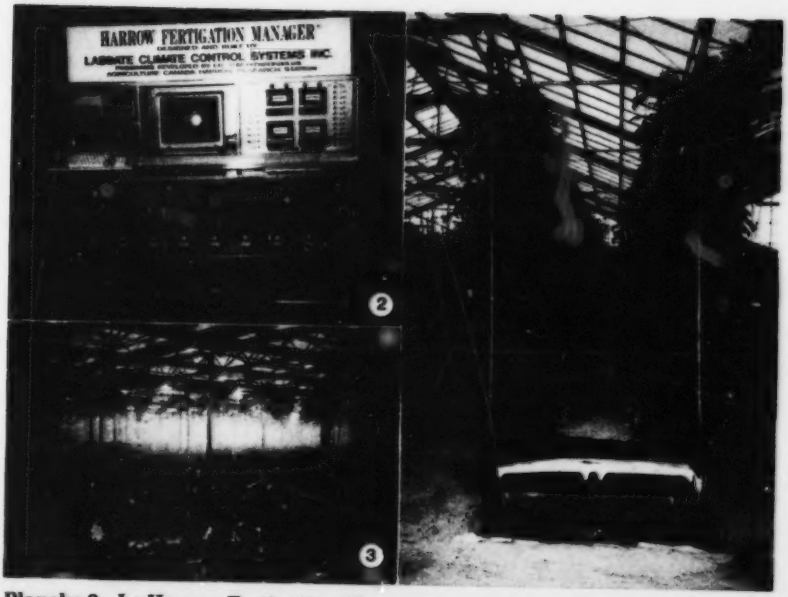

Planche 2 Le Harrow Fertigation Manager, un système informatisé d'injection d'engrais multiples.*

* **Le Harrow Fertigation Manager et le HFM sont des marques de commerce déposées par la Labbate Climate Control Systems Inc., 1, Wilkinson Drive, Leamington (Ont.).**

Planche 3 Une production de tomates hâtives de printemps cultivées sur laine de roche. On utilise un éclairage artificiel pour favoriser la croissance, la brumisation, pour maîtriser l'humidité relative et un plastique blanc sur le sol, pour réfléchir la lumière, réduire la poussière et régulariser l'évaporation. Les autres éléments qui n'apparaissent pas dans cette figure représentant une serre moderne sont la gestion informatique de l'environnement, le système d'approvisionnement de gaz carbonique liquide, le système de chauffage à eau chaude et les écrans thermiques

Planche 4 La technique de culture en couche profonde a été mise au point au Japon, et elle est très répandue dans les pays de l'Extrême-Orient. La construction modulaire du système de culture comprend un support pour les plantes, un réseau de bacs fabriqués principalement avec du polystyrène préformé, un film de polyéthylène coextrudé noir et blanc qui sert à protéger la solution nutritive contre la contamination et la lumière et des surfaces de plastique blanc placé sur le sol et dans les bacs pour réfléchir la lumière.

Application d'engrais avant la plantation

Faire l'application d'engrais de base après l'étuvage et le lessivage du sol, et les incorporer au sol de serre avec un motoculteur. Ces engrais s'ajoutent à la chaux requise pour corriger le pH du sol (tableau 7). En général, on inclut la plus grande quantité possible de calcium et de phosphore comme engrais de base; ces éléments nutritifs se conservent bien dans le sol, et on élimine la plupart des problèmes de colmatage lorsqu'ils ne circulent pas dans le système d'irrigation. Le calcium est fourni sous forme de chaux et le phosphore, sous forme de superphosphate, et ils doivent être broyés finement. De plus, en raison de la nature de leur source et de leur aptitude à lier les particules du sol, ces éléments nutritifs pénètrent lentement dans la solution du sol; par conséquent, ils n'augmentent pas beaucoup la quantité totale de sels et ils ne perturbent pas l'équilibre des composants nutritifs des sols, auxquels ils s'ajoutent sous forme d'engrais de base.

Les tomates ont besoin de beaucoup de potassium, et il faut donc en inclure une bonne quantité en même temps que le magnésium dans l'engrais de base; le rapport potassium/magnésium dans le sol doit être de 2/1. Éviter toute application d'azote. La décision finale concernant l'engrais de base doit seulement être prise d'après les résultats de l'analyse du sol et après avoir consulté le spécialiste en horticulture. Les taux recommandés d'engrais de base qu'on trouvera au tableau 8 doivent uniquement servir de directive générale.

Tableau 8 Engrais de base recommandés

Engrais	Quantité
Superphosphate (0-20-0, fin)	250 kg/ha
Sulfate de potassium	500 kg/ha
Sulfate de magnésium	250 kg/ha
On peut y ajouter les produits suivants au besoin :	
Tourbe	800 balles/ha
Chaux calcique	800 kg/ha

Travail du sol

Il faut travailler le sol afin de le préparer pour la stérilisation, pour l'apport de matière organique, de chaux et d'engrais, ainsi que pour établir le lit de semence. En général, les bêches rotatives sont préférables, car elles permettent un travail du sol plus uniforme tout en perturbant le moins la structure du sol. Un labour répété avec des bêches rotatives peut causer la formation d'une couche compacte lorsque la profondeur de labour n'est pas modifiée à l'occasion.

Arrosage

On recourt généralement à l'irrigation par inondation, quoique certains appareils automatisés peuvent également servir. Le but de l'arrosage est de fournir suffisamment d'eau au système radiculaire, sans toutefois imbiber le sol au point d'empêcher l'air de se rendre aux racines. Il n'est pas recommandé d'attendre que les plantes commencent à se faner pour les arroser. Il est bon de vérifier si le sol est humide jusqu'au fond pour déterminer la quantité d'eau qui s'y trouve avant de commencer une nouvelle irrigation.

Arroser régulièrement aux mêmes jours de la semaine n'est pas conseillé, car le besoin des plantes en eau peut varier d'un jour et d'une saison à l'autre. Dans le cas des jeunes plants repiqués dans la serre en janvier ou en février, l'arrosage doit être fait aux 10 ou aux 15 jours et ne tremper que 15 à 20 cm du sol. Ces mêmes jeunes plants repiqués en juin ont besoin de 5 à 10 fois plus d'eau.

Chaque producteur de tomates en serre doit connaître la quantité d'eau qu'il faut ajouter au sol à chaque application. Cette connaissance et l'examen du sol avant l'arrosage et plusieurs heures après permettent de déterminer l'efficacité de l'arrosage.

Calendrier de fertilisation

En plus d'une fertilisation faite avant la plantation, il faut ajouter régulièrement des engrais pendant la période de végétation. Les engrais utilisés pour les plantes en cours de végétation active sont appliqués sous forme de poudre, comme dans le cas des engrais de base, et ils sont épandus à la volée sur la totalité ou presque du sol de serre mis en culture. Le tableau 9 présente les taux d'application recommandés.

Paillage

Le sol doit être paillé lorsque les plants de tomate ont atteint environ 50 cm de hauteur. La paille est le matériau le plus utilisé pour le paillage, mais les épis de maïs broyés sont également acceptables. En plus de réduire l'évaporation et le compactage du sol, le paillis empêche d'éclabousser le sol sur les plants à l'arrosage, et il se produit moins de poussière dans la serre. Le paillis libère aussi une grande quantité de gaz carbonique à mesure qu'il se décompose, ce qui favorise la croissance des plantes. Il se transforme en matière organique utile après avoir été incorporé au sol à la fin de la saison de culture. Toutefois, comme on l'a déjà mentionné, le paillage avec des sous-produits organiques soulève le problème bien connu associé à l'addition de matière organique dans les sols cultivés de façon intensive. Le paillage n'était pas très à la mode ces dernières années, et on lui préférait l'application d'un film de polyéthylène blanc pour recouvrir le sol chaque fois que la méthode d'irrigation le permettait. Ce moyen de rechange offre

plusieurs avantages, et il donne les meilleurs résultats avec un système d'irrigation goutte-à-goutte.

Tableau 9 Guide de fertilisation (kg/ha)

	Solution n° 1		Solution n° 2*			
Nombre de semaines après la plantation	Solution de départ 10-52-10	20-5-30	Sulfate de magnésium	Nitrate de potassium	Nitrate de calcium	Nitrate d'ammonium
1	100					
2	50					
3	50					
4	100					
5		100	100	50	50	
6		100		50		
7		100	100	50	100	
8		100		50		
9		100	100	100	100	
10		100		100		
11		100		100	100	
12		100	100	100		
13		100		100	100	
14		100		100		
15		100	100	100	100	0,5
16		100		100		
17		100		100	100	0,5
18		100	100	100		
19		100		100	100	0,5
20		100		100		
21		100	100	100	100	0,5
22		100		100		
23		100		100	100	0,5
24		100		100		
25		150				
26		150				

- Choisir des formules d'engrais solubles qui sont exemptes autant que possible de chlorures, de sulfates et de carbonates.
- Ne pas modifier le calendrier d'application pour une culture de printemps.
- Omettre les semaines 3 et 4 et passer de la semaine 2 à la semaine 5 lorsque le sol est peu fertile ou que les cultivars sont hâtifs comme le Vendor.
- Omettre les semaines 2, 3 et 4 et passer immédiatement de la semaine 1 à la semaine 5 pour une culture d'automne.
- *Mise en garde* : Lorsque les engrais sont dilués dans des solutions-mères épaisses avant l'application, ils doivent être regroupés tel que précité. Ne pas mélanger dans la même solution concentrée un engrais renfermant du calcium et un engrais renfermant du sulfate ou du phosphate, car il se formerait un précipité insoluble qui pourrait boucher le système d'arrosage.

Chapitre 6 Culture sur sol avec irrigation goutte-à-goutte

Le système de culture avec irrigation goutte-à-goutte ressemble au système classique de culture sur sol, mais il offre l'avantage additionnel de permettre la maîtrise de la croissance par la régularisation des apports d'eau et d'éléments nutritifs. Le système contribue aussi à réduire l'humidité relative dans la serre, car il n'a pas besoin d'une irrigation de toute la surface du sol et il permet d'utiliser le film de polyéthylène blanc comme paillis ce qui favorise la réflexion de la lumière. On fait donc ainsi un meilleur usage des ressources accessibles, dont l'énergie.

On peut irriguer la plante jusqu'à quatre fois par jour, et l'engrais est incorporé à l'eau d'arrosage. On appelle fertigation cette méthode de fertilisation par l'entremise du système d'irrigation, et elle est très répandue dans la culture des légumes en serre. En vertu de cette méthode, les engrais sont dissous dans un grand réservoir et la solution est pompée jusqu'à la plante; les engrais peuvent également se retrouver dans des solutions-mères qui sont incorporées à l'eau d'irrigation au moyen d'injecteurs d'engrais.

Plusieurs marques et modèles d'injecteurs d'engrais sont vendus dans le commerce à des prix variables, et ils permettent un contrôle de la fertigation à divers degrés. La Station de recherches de Harrow (Ont.) a récemment mis au point un système perfectionné d'injection d'engrais qui peut satisfaire automatiquement les besoins nutritifs de nombreuses plantes en puisant dans la même solution-mère (planche 2).

Le système Harrow FM fait appel à un ordinateur IBM compatible pour activer un groupe de pompes doseuses à diverses fréquences et faire l'application préprogrammée d'une concentration voulue de chaque élément nutritif. De plus, le Harrow FM règle automatiquement l'apport d'eau et d'éléments nutritifs aux plantes conformément à des données spéciales introduites en mémoire et d'après les conditions de la plante et du milieu indiquées par les détecteurs appropriés.

Avec le système d'irrigation et de fertigation goutte-à-goutte, il n'est plus nécessaire d'évaluer les besoins nutritifs des plantes selon la superficie cultivée, mais plutôt en fonction de la concentration d'engrais (et donc la concentration d'éléments nutritifs) dans l'eau d'irrigation. Les engrais de base ne sont pas généralement appliqués lorsqu'on recourt au système d'irrigation goutte-à-goutte, sauf qu'il peut s'avérer nécessaire d'ajouter de la tourbe et de la chaux pour améliorer la structure du sol et corriger le pH.

Le tableau 10 expose un programme de fertilisation recommandé pour la plupart des sols classés dans les catégories variant des loams aux loams sableux.

Tableau 10 Calendrier de fertilisation pour les cultures irriguées au goutte-à-goutte (kilogrammes d'engrais par 1 000 L de solution-mère)

Nombre de semaines après la plantation	Nitrate de calcium	Nitrate de potassium	Nitrate d'ammonium	Phosphate monopotassique	Sulfate de potassium	Sulfate de magnésium	Litres/jour	CE (µS/cm)
Culture de printemps								
1, 2, 3, 4,	44,0	6,0	0	22,0	126,0	50,0	0,4	3 500
5, 6, 7, 8	44,0	25,0	0	22,0	108,0	50,0	0,6	3 000
9, 10, 11	44,0	44,0	0	22,0	68,0	50,0	1,0	2 500
12, 13	44,0	64,0	0	22,0	0	50,0	1,2	2 300
14, 15	60,0	64,0	0	22,0	0	50,0	1,4	2 200
16, 17	76,0	64,0	7,0	22,0	0	50,0	1,6	2 000
18, 19, 20	76,0	64,0	22,0	22,0	0	50,0	1,6	1 800
21, 22, 23, 24, 25	76,0	64,0	30,0	22,0	0	50,0	1,6	1 600
26, 27, 28, 29, 30	76,0	64,0	30,0	22,0	0	50,0	1,6	1 400
Culture d'automne								
1, 2, 3, 4	76,0	64,0	7,0	22,0	0	50,0	0,6	1 400
5, 6, 7, 8	60,0	64,0	0	22,0	0	50,0	0,8	1 500
9, 10	44,0	64,0	0	22,0	0	50,0	1,0	1 800
11, 12	44,0	44,0	0	22,0	68,0	50,0	1,0	2 000
13, 14	44,0	25,0	0	22,0	108,0	50,0	0,8	2 200
15, 16, 17, 18	44,0	6,0	0	22,0	126,0	50,0	0,4	2 500

- Ajouter aussi des oligo-éléments à tous les engrais susmentionnés, p. ex. 0,7 kg de STEM et 0,5 kg de chélate de fer (13 % de fer); une solution type d'oligo-éléments, comme le STEM de Peters, renferme 1,45 % de bore, 3,2 % de cuivre, 7,5 % de fer, 8,15 % de manganèse, 0,046 % de molybdène et 4,5 % de zinc.
- Dissoudre une quantité donnée de chaque engrais, y compris les oligo-éléments, dans 1 000 L d'eau et ajouter à l'eau d'irrigation à doses égales au moyen d'un injecteur à têtes multiples. Commencer par injecter de très faibles doses, et augmenter progressivement jusqu'à ce que le degré de CE soit atteint. Amener le pH de la solution de fertigation à 5,5 en injectant une solution diluée d'acide phosphorique, nitrique ou sulfurique.
- Le titre recommandé des solutions-mères doit correspondre à la capacité de l'injecteur d'engrais ayant un taux de dilution de 1/100. Lorsque l'injecteur d'engrais utilisé a un taux de dilution de 1/200, doubler la quantité de chaque engrais. Des corrections semblables peuvent être faites lorsqu'on utilise des injecteurs ayant d'autres taux de dilution. Dans le cas où la limite de solubilité d'un engrais (p. ex. le sulfate de potassium) est dépassée, on peut préparer plus d'une solution-mère avec le même engrais et répartir l'engrais en quantité égale entre les solutions-mères.

Chapitre 7 Culture sur tourbe et sur d'autres milieux organiques

La tourbe est légère et possède une bonne capacité de rétention d'eau; elle répond bien à d'autres critères comme le drainage, l'aération et la stabilité biologique et chimique du milieu. De plus, la tourbe est abondante au Canada et on peut s'en procurer facilement. Elle est utilisée seule ou avec d'autres matériaux comme la vermiculite, la perlite, le Turface et les granules de polystyrène, et elle entre dans de nombreux mélanges aux caractéristiques physiques diversifiées. En plus d'avoir une bonne capacité de rétention d'eau, la tourbe possède une grande capacité d'échange cationique et sa structure reste suffisamment stable pendant la culture. La vermiculite horticole libère du potassium et du magnésium pendant la période de végétation, une caractéristique vraisemblablement plus nuisible qu'utile parce qu'il est difficile de maîtriser l'assimilation de ces éléments nutritifs. La vermiculite possède toutefois une grande capacité d'échange cationique qui augmente le pouvoir tampon du mélange et qui réduit par le fait même le risque de surfertilisation. Par contre, la perlite, le Turface et les granules de polystyrène sont des matières totalement inertes qui ne modifient pas la propriété d'assimilation des éléments nutritifs du mélange si ce n'est qu'elles améliorent le degré d'aération; les producteurs préfèrent ces matières parce qu'elles ne se décomposent pas aussi rapidement que la vermiculite et qu'elles permettent de doser avec plus de précision la nutrition de la plante. De récents travaux de recherche ont montré que la porosité de la tourbe enrichie de perlite diminue rapidement avec le temps, mais que la porosité du mélange tourbe–polystyrène ne diminue pas. Le polystyrène contribue effectivement à augmenter la teneur en air du substrat, mais les plantes ne profitent pas d'une grande quantité de cet air emprisonné dans les granules de polystyrène mêmes. Le sable s'apparente presque aux matières inertes et a beaucoup servi dans le passé; toutefois, comme tous les sols, son emploi n'est pas recommandé à moins de l'avoir stérilisé au préalable. Par contre, la perlite, la vermiculite, le Turface et les granules de polystyrène sont stériles à la livraison à cause des températures élevées du processus de fabrication.

À part la tourbe, la sciure constitue un milieu organique important pour la culture de la tomate, surtout au Canada. On ne décrit toutefois ce produit qu'en termes généraux dans une section ultérieure, car d'autres publications ont déjà traité ce sujet en détail.

Culture en bac

Une fois que le milieu de croissance est mélangé, il est habituellement placé dans un contenant. Les contenants les plus répandus pour les mélanges sans sol étaient aux débuts des bacs en bois tapissés de polyéthylène de 15 à 20 cm de profondeur. Un drain placé au centre du bac assurait l'évacuation de l'eau et acheminait la vapeur durant la stérilisation (fig. 13). Une couche de gravier favorisait le drainage général et protégeait le polyéthylène pendant la culture. Comme les mélanges sans sol sont naturellement

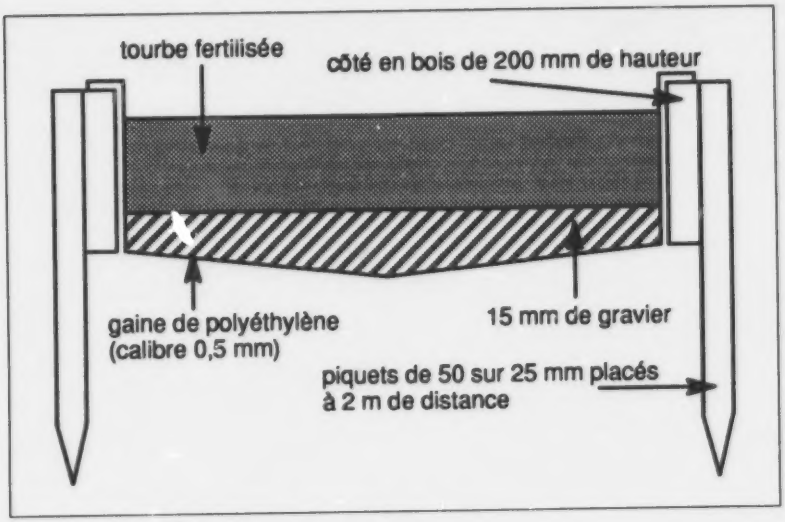

Fig. 13 Culture des tomates en bac.

pauvres en éléments nutritifs, on doit ajouter des engrais pour optimiser la croissance des plantes. Deux grandes méthodes servent à fertiliser les plantes cultivées sur tourbe, et la plus simple des deux consiste à ajouter tous les éléments nutritifs requis par la plante au moment de la préparation du mélange tourbeux (tableau 11).

Tableau 11 Composition d'un mélange complet sans sol à base de tourbe et de vermiculite (1,0 m^3)

Constituant	Quantité
Tourbe horticole	0,5 m^3 (2 balles compressées de 0,17 m^3)*
Vermiculite horticole	0,5 m^3 (4,5 sacs de 0,11 m^3)
Chaux dolomitique	7,5 kg
Gypse (sulfate de calcium)	3,0 kg
Nitrate de calcium	0,9 kg
Superphosphate (20 %)	1,5 kg
Sulfate de magnésium (sel d'Epsom)	0,3 kg
Osmocote 18-6-12 (9 mois)	de 5 à 6 kg
Oligo-éléments frittés (503)	225 g
Fer chélaté (NaFe 138 ou 330)	30 g

* Le volume des balles décompressées peut être de 50 % supérieur au volume des balles compressées.

Cette méthode est bonne si les engrais à l'action prolongée peuvent approvisionner la plante sans interruption en azote, en phosphore et en potassium pendant toute la saison de végétation. La chaux calcique, qui est ajoutée d'habitude à la tourbe pour corriger le pH, comble les besoins de la plante en calcium. Le processus est complété par l'addition d'oligo-éléments frittés à action prolongée qui sont assimilables pendant toute la saison de culture. Le principal avantage de cette méthode est de ne pas avoir à alimenter la plante pendant toute la saison, à moins de détecter une carence en éléments nutritifs. Parmi les principaux inconvénients, mentionnons la faible maîtrise de la nutrition et la possibilité de pertes végétales à cause des sels excédentaires produits par la décomposition trop rapide des engrais à action prolongée lorsque les températures varient de très élevées à moyennes.

Une méthode de nutrition plus répandue consiste à incorporer une application de base d'engrais soluble lorsque la tourbe est mélangée (tableau 12) et à ajouter des engrais solubles à intervalles réguliers par l'entremise du système d'irrigation (tableau 13).

La composition des engrais détermine dans une certaine mesure la vigueur d'une plante et l'équilibre entre la croissance végétative et celle du fruit. Par exemple, un aliment riche en potasse (1/0/3,5) est généralement utilisé pour maîtriser la croissance pendant une brève période après la plantation, lorsque l'éclairement est mauvais. Par contre, on utilise un aliment riche en azote (1/0/1) pour que la plante garde une bonne vigueur presque tout l'été, lorsque la productivité et l'éclairement sont bons. À l'opposé de la culture sur sol, la culture sur tourbe a besoin qu'on lui ajoute régulièrement du phosphate, car cet élément est rapidement lessivé de la tourbe et doit être remplacé pour maintenir un taux suffisant. L'alternance d'un aliment qui renferme du phosphate (par exemple 1/0,5/2) et d'un aliment ordinaire (par exemple 1/0/2) assure un apport de phosphate pendant toute la saison. Le phosphore peut aussi être fourni régulièrement avec un aliment spécial renfermant du phosphate, mais il faut alors

Tableau 12 Composition d'un mélange de base de tourbe et de vermiculite (1 m^3)

Constituant	Quantité
Tourbe horticole	0.5 m^3 (2 sacs de 0,17 m^3)*
Vermiculite horticole	0.5 m^3 (4,5 sacs de 0,11 m^3)
Calcaire (à pulvériser)	5,9 kg
Superphosphate (20 %)	1,2 kg
Nitrate de potassium	0,9 kg
Sulfate de magnésium	0,3 kg
Fer chélaté 10 %	35 g
Borax (borate de sodium)	35 g
Oligo-éléments frittés (503 ou 302)	110 g

* Le volume des balles décompressées peut être de 50 % supérieur au volume des balles compressées.

Tableau 13 Aliments pour les tomates cultivées sur tourbe

Type d'aliment	Rapport (N/P/K)	Engrais	Quantité (kg/1 000 L)	Quantité de N/P/K/Ca/Mg (ppm)
Potasse	1/0/3,5	{nitrate de potassium	110}	145/0/500/0/0
		{sulfate de potassium	20}	
Potasse et magnésium	1/0/2	{nitrate de potassium	90}	
		{nitrate d'ammonium	20}	175/0/350/0/30
		{sulfate de magnésium	30}	
Potasse et phosphate	1/0,5/2	{nitrate de potassium	90}	
		{phosphate monoammonium	30}	175/85/350/0/0
		{nitrate d'ammonium	7}	
Potasse et calcium	1/0/2	{nitrate de potassium	90}	175/0/350/70/0
		{nitrate de calcium	40}	
Azote et magnésium	1/0/1	{nitrate de potassium	65}	
		{nitrate d'ammonium	50}	250/0/250/0/30
		{sulfate de magnésium	30}	
Azote et phosphate	1/0,5/1	{nitrate de potassium	65}	
		{phosphate monoammonium	45}	250/125/250/0/0
		{nitrate d'ammonium	33}	
Azote et calcium	1/0/1	{nitrate de potassium	65}	
		{nitrate de calcium	45}	250/0/250/85/0
		{nitrate d'ammonium	28}	

Note Les doses d'engrais sont exprimées en kilogrammes par 1 000 L de solution-mère. La formule des solutions-mères a été établie en supposant qu'un injecteur ayant un taux de dilution de 1/100 (une partie de solution-mère par 100 parties d'eau) est utilisé pour incorporer une seule solution-mère à la fois dans l'eau d'irrigation. On peut également dissoudre les engrais recommandés pour chaque aliment dans 100 000 L d'eau et les appliquer directement sur la culture.

incorporer le calcium ou le magnésium dans des aliments distincts. Il ne faut jamais oublier que les solutions concentrées à base de calcium qui entrent en contact avec les solutions à base de phosphate peuvent produire du phosphate de calcium non soluble qui colmate le système d'irrigation. De même, on ne doit pas mélanger de grandes concentrations de sulfate de magnésium avec des engrais à base de phosphate. En général, il y a des oligo-éléments dans les substrats tourbeux sous forme de mélanges de verre fritté qui libèrent lentement leurs éléments nutritifs tout au long de la saison de culture. Une carence en oligo-éléments peut être corrigée par l'application de mélange d'oligo-éléments chélateurs.

Il est recommandé de mélanger régulièrement des chélates à l'engrais liquide ou sous forme de pulvérisation foliaire pour rectifier une carence. Le taux recommandé dépend du produit utilisé, et il est généralement préférable de suivre les recommandations du fabricant. En général, les conseils de nutrition donnés dans la présente publication devraient convenir pendant toute la saison aux plantes cultivées dans un substrat tourbeux. Toutefois, lorsque les taux d'éléments nutritifs du substrat sont trop élevés ou trop bas, il est possible de réduire ou d'augmenter la force de

l'engrais liquide pour compenser. La meilleure solution est d'installer un système d'injection muni d'un dispositif de surveillance continue et d'un indicateur, afin de pouvoir incorporer dans le substrat la quantité d'eau et d'éléments nutritifs qui répond le mieux aux besoins de la plante (planche 2).

Les taux de conductivité et de potassium indiqués dans l'échelle proposée s'appliquent au début de la saison de végétation, lorsque l'éclairement est limité. S'il arrive qu'une première analyse du substrat tourbeux indique un taux d'éléments nutritifs qui s'écarte de l'échelle proposée, on peut en déduire que le milieu convient encore pour la culture des légumes, mais qu'il faut modifier quelque peu le programme de nutrition pour ramener les taux dans des limites acceptables. Après avoir atteint le niveau analytique optimal pour le substrat tourbeux, on élabore un régime nutritionnel qui maintient un taux d'éléments nutritifs optimal dans le substrat. En général, il est bon d'appliquer l'engrais liquide à chaque arrosage en utilisant un engrais potassique moyen (1/0/2) qui renferme du potassium à une teneur nominale de 300 ppm.

Culture en sac de tourbe

Il est actuellement facile de se procurer des sacs de plastique remplis d'un milieu de croissance à base de tourbe. Le sac de tourbe mesure 35 cm × 105 cm à plat et renferme 42 L de tourbe fertilisée (ou un mélange de tourbe et de vermiculite, perlite ou polystyrène), et il peut accueillir jusqu'à trois plants de tomate lorsqu'un système d'irrigation goutte-à-goutte assure une fertilisation et un arrosage réguliers.

On recouvre le plancher de la serre avec un film de polyéthylène (planches 3 et 4), sur lequel on dépose les sacs. Certains producteurs utilisent un film de polyéthylène noir et blanc; le côté noir est placé contre le sol pour empêcher la croissance des mauvaises herbes, et le côté blanc réfléchit la lumière du soleil dans le feuillage de la plante. Pratiquer trois à quatre incisions de 4 cm sur les côtés du sac pour assurer le drainage du milieu de croissance. La profondeur de plantation dans le substrat tourbeux est un facteur important qui peut modifier la croissance ultérieure. La profondeur de plantation est d'autant plus importante lorsque la couche de tourbe n'est pas très épaisse, surtout lorsqu'un réservoir d'eau permanent occupe une partie du sac de tourbe qui ne peut ainsi servir à la croissance active des racines. On place ce réservoir d'eau à la base du sac de tourbe et on perfore des trous de drainage plus haut. On recommande une épaisseur minimale du substrat de 10 cm, une profondeur de plantation de 2,5 cm, une couche de 5 cm de tourbe drainée sous le pot et un réservoir d'eau de 2,5 cm au-dessous du niveau de drainage. Seuls deux aspects distinguent la culture en sac de tourbe de la culture ordinaire sur sol : l'arrosage et l'alimentation. L'arrosage des plantes cultivées dans la tourbe n'est pas difficile lorsqu'on observe certaines règles élémentaires, que l'on vérifie fréquemment la teneur en eau du substrat tourbeux et que l'on prend les mesures appropriées au moment opportun. En fait, l'arrosage de ce milieu de croissance est plus facile que celui d'un véritable sol, car il est plus difficile d'évaluer la teneur en eau d'un sol, et les

caractéristiques de drainage du sol et du sous-sol rendent l'arrosage plus problématique. Par contre, les sacs de tourbe ne représentent qu'un faible volume de milieu de croissance, et ils ont par conséquent une capacité de rétention d'eau beaucoup moins grande que celle de la plupart des sols. Il faut arroser au bon moment, sinon les effets néfastes se manifestent plus rapidement que pour les plantes cultivées sur sol. On recommande d'observer les règles suivantes pour l'arrosage des plantes cultivées en sac de tourbe :

- Utiliser un sac de tourbe drainé et un réservoir d'eau en dessous.
- Prévoir des bouches d'irrigation supplémentaires aux endroits où il faut plus d'eau.
- Assurer le bon fonctionnement du système d'irrigation en prévenant ou en dégageant sans retard tout colmatage.
- Vérifier fréquemment le taux d'humidité du substrat et modifier l'arrosage au besoin.
- Varier la fréquence des arrosages plutôt que la quantité d'eau appliquée chaque fois, afin que le substrat soit aéré entre les arrosages et que le taux d'humidité soit gardé uniforme d'un sac à l'autre.

Un programme d'arrosage mal exécuté peut causer des problèmes comme la saturation en eau, l'assèchement excessif et une trop grande variation du taux d'humidité d'un sac à l'autre. *La saturation en eau*, se détecte facilement et se manifeste par une croissance ralentie des plantes et une faible densité du feuillage. Lorsque la saturation est plus prononcée, la tête jaunit ce qui indique une carence en fer. Les problèmes de saturation apparaissent généralement lorsque la période entre les arrosages n'est pas suffisamment longue pour permettre une bonne aération du milieu de croissance. Il se peut que l'application d'une trop grande quantité d'eau une première fois n'ait pas d'effet puisque l'eau excédentaire s'écoule par le drainage, mais une deuxième application faite avant que la teneur en eau du substrat soit revenue au taux minimal normal peut ralentir l'activité des racines et amorcer le cycle de saturation. On peut éviter ce problème en faisant des vérifications régulières et fréquentes pour régulariser la fréquence d'arrosage. Une fois que les plantes montrent des signes de saturation, le processus de rétablissement peut être long : il faut interrompre l'arrosage du substrat tant que sa teneur en eau n'est pas retombée au taux minimal normal, peu importe le temps que cela prendra. Il se produit nécessairement une perte de rendement lorsqu'on s'emploie à rectifier la situation.

Le problème d'un assèchement excessif est également grave, mais tout aussi facile à éviter, pourvu que le système d'irrigation fonctionne bien et qu'on ait assez de temps pour exécuter le programme d'arrosage. La croissance est ralentie lorsque le taux d'humidité du milieu de culture baisse souvent au-dessous du niveau minimal normal, c'est-à-dire lorsqu'on ne peut plus faire jaillir l'eau en appliquant une pression avec la main, et les effets sont encore plus néfastes quand la teneur en sels du milieu est élevée. Lorsqu'un assèchement trop prononcé a lieu fréquemment, il se produit un arrêt de croissance général accompagné d'une perte de rendement considérable. Le remède est simple et se résume

à une plus grande application d'eau en augmentant la fréquence de l'irrigation. Il peut se passer plusieurs jours avant que l'on constate un redressement de la situation; rien ne sert d'appliquer de grandes quantités d'eau à chaque irrigation, car la plupart de l'eau s'écoule alors par ruissellement.

Le troisième problème relié à l'arrosage est une trop grande variation du taux d'humidité dans le milieu de croissance. L'application d'eau n'est jamais suffisamment précise pour tenir compte de toutes les variations qui surviennent dans une culture, et il peut se créer d'importants déséquilibres. De plus, les plantes à croissance rapide peuvent développer des problèmes de carence en eau en certains endroits, et les plants faibles, malades ou manquants, peuvent provoquer une saturation en certains endroits. Lorsque le problème n'est pas trop grave, il est possible de rééquilibrer une plante en faisant un arrosage occasionnel au boyau pour humidifier les zones sèches et en supprimant temporairement une ou plusieurs bouches d'irrigation dans les zones saturées d'eau. Il arrive parfois qu'une saturation puisse prévenir ou corriger un grand déséquilibre dans l'arrosage, mais cette mesure ne peut être prise que pour une plante en croissance active et dont le système radiculaire est vigoureux. Elle peut également servir pour lessiver les sels excédentaires qui se trouvent dans le substrat. La règle générale en matière d'irrigation est d'arroser jusqu'à ce que la zone la plus sèche ait obtenu toute l'eau nécessaire à chaque irrigation. On évite ainsi d'augmenter toute variation dans la teneur en eau, et les zones du substrat qui ont moins besoin d'eau laissent écouler le surplus par drainage sans aucun risque.

Les producteurs qui envisagent d'utiliser un substrat tourbeux pour faire la culture des tomates en serre doivent savoir que l'arrosage exige beaucoup d'attention et un système d'irrigation fiable, et ils peuvent considérer que le risque de commettre des erreurs avec un substrat tourbeux est trop grand pour justifier l'abandon de la culture sur sol qu'ils pratiquent. Toutefois, les erreurs d'arrosage dans un substrat tourbeux se traduisent rapidement par des symptômes visibles, et il s'agit d'un facteur positif pour ce substrat et pour d'autres systèmes de culture sans sol. En effet, le mauvais arrosage dans une culture sur sol n'est généralement détecté qu'après une modification considérable des habitudes de croissance de la plante. Ainsi, même si le sol a une plus grande capacité de rétention d'eau et un meilleur pouvoir tampon, il peut quand même se produire de grandes pertes de rendement sans que le producteur se soit rendu compte qu'une erreur a été commise. Un producteur compétent qui utilise la tourbe peut détecter les erreurs d'irrigation dès qu'elles se manifestent dans le mélange tourbeux et les rectifier avant qu'elles nuisent aux plantes. Par suite de la récente mise au point de régulateurs automatiques d'irrigation munis de tensiomètres sol–eau bien adaptés, l'irrigation des plantes cultivées dans les sacs de tourbe est beaucoup simplifiée et l'on réalise d'importantes économies d'eau et d'éléments nutritifs tout en réduisant une trop grande perte d'éléments nutritifs par lessivage.

La nutrition est l'autre facteur important qui distingue vraiment les tomates cultivées sur tourbe de celles cultivées sur sol. Les substrats tourbeux ont un pouvoir tampon bien moins grand que celui de la plupart des sols en ce qui concerne les macro-éléments et les oligo-éléments. Le producteur doit donc surveiller continuellement la quantité d'éléments nutritifs assimilables dans le substrat, pour ensuite régler en conséquence la composition des aliments appliqués. Ce travail exige un service d'analyse rapide et fiable, ainsi qu'une technique précise et sûre pour l'application fréquente de fertilisants. Les résultats de l'analyse du substrat tourbeux permettent de prendre des mesures correctives pour optimiser l'état de la zone radiculaire avant que l'on détecte des symptômes négatifs sur la plante; en effet, il est beaucoup plus risqué de subir une perte de rendement lorsqu'on se fie uniquement aux symptômes manifestés par la plante pour déterminer les changements qu'il faut apporter au programme d'alimentation. Le service d'analyse est d'une grande utilité, mais il est tout aussi important que le producteur puisse interpréter les résultats et prendre les mesures correctives nécessaires. Les proportions d'éléments nutritifs qui se trouvent au départ dans les substrats tourbeux peuvent varier selon le fournisseur du produit, la source et le type de tourbe utilisé, et les échelles présentées au tableau 14 peuvent être considérées comme normales et servir uniquement à titre indicatif.

Les résultats de l'analyse de la tourbe varient en fonction de l'échantillonnage et des méthodes d'analyse. Ainsi, pour être en mesure de comparer les résultats d'analyse d'un échantillon de tourbe aux lignes directrices présentées au tableau 14, il faut respecter les conditions suivantes :

- Prélever un échantillon de toute l'épaisseur de la tourbe.
- Faire le prélèvement près d'une plante en croissance et à travers la zone radiculaire.
- Prélever plusieurs échantillons aux endroits de la serre qu'on veut soumettre à l'analyse, et les mélanger pour obtenir au moins un demi-litre de substrat qui servira à l'analyse.
- Ne pas prélever d'échantillons immédiatement après un arrosage ou à des endroits qui sont manifestement plus humides ou plus secs que la moyenne.
- Uniformiser la teneur en eau des échantillons de substrat tourbeux prélevés selon les directives précitées, en les arrosant avec de l'eau distillée ou en leur permettant de sécher suffisamment avant de procéder à l'analyse. La teneur en eau est jugée convenable lorsqu'une petite quantité d'eau suinte d'une poignée de tourbe serrée modérément dans la main.
- Toutes les analyses sont faites sur l'échantillon de substrat tourbeux en suspension dans l'eau, et le rapport entre la tourbe et l'eau distillée est de 1/1,5 par volume.

Les essais réalisés et les déclarations des commerçants semblent indiquer que le substrat tourbeux peut être recyclé sans qu'il y ait de réduction du rendement. Toutefois, la valeur culturale du substrat tourbeux recyclé peut être modifiée par les facteurs suivants :

- la proportion et l'uniformité des éléments nutritifs dans la tourbe
- le taux de sels dans le substrat
- les parasites ou les maladies.

Tableau 14 Concentration souhaitable des éléments nutritifs dans le substrat d'un sac de tourbe, selon un taux de dilution substrat-eau de 1/1,5

Élément nutritif	Concentration (ppm)
Azote (nitrate)	de 30 à 80
Phosphore	de 20 à 50
Potassium	de 140 à 400
Calcium	de 140 à 200
Magnésium	de 25 à 35
Acidité (pH)	de 5,5 à 6,6
Conductivité électrique (µS/cm)	de 1 000 à 2 500

Les producteurs qui veulent réutiliser les sacs doivent réduire de moitié la force des engrais environ 6 semaines avant le terme prévu de la première culture, et appliquer de l'eau ordinaire pendant les 2 à 3 dernières semaines. Cette période prolongée de lessivage graduel des éléments nutritifs permet de réduire les taux d'éléments nutritifs dans le substrat tourbeux. La réduction des taux d'éléments nutritifs varie en fonction de l'efficacité du lessivage. Par exemple, dans un substrat bien lessivé, le taux de nitrate est très bas, les taux de phosphate et de potassium sont bas, et les taux de calcium et de magnésium restent élevés. Pour limiter les problèmes causés par un manque d'uniformité dans la teneur en éléments nutritifs des sacs de tourbe qui sont réutilisés, on stérilise en général le milieu tourbeux lessivé. Après la stérilisation, on analyse le milieu tourbeux et on ajoute les engrais de base nécessaires avant le réensachage. L'étuvage a la même fonction pour le sol que pour la tourbe, soit de détruire les organismes nuisibles tout en préservant la plupart des organismes et des éléments nutritifs utiles tout en évitant une accumulation de sels. L'étuvage ne doit donc pas être excessif, et il suffit d'élever la température du substrat à 82 °C pendant 20 min. Comme pour le sol, la tourbe ne doit pas être trop humide ni trop sèche au moment de l'étuvage afin d'éviter les coûts inutiles et une diminution de l'efficacité du processus. Comme on utilise en serre beaucoup moins de substrat tourbeux que de sol, l'étuvage de la tourbe exige considérablement moins d'énergie et de main-d'œuvre.

Système Harrow de culture en sac de tourbe

Au début des années 1980, la Station de recherches de Harrow a mis au point un système de culture en sac de tourbe pour la production de tomates

en serre. Les recommandations concernant le milieu de croissance à base de tourbe et le programme de fertigation correspondant sont respectivement présentés aux tableaux 15 et 16.

Tableau 15 Milieu de croissance recommandé pour la culture des tomates en sac de tourbe

3 sacs (0,17 m^3) de tourbe (57 % du volume total) 3 sacs (0,11 m^3, 7 kg) de vermiculite (25 % du volume total) 2 sacs (0,11 m^3, 7 kg) de perlite (18 % du volume total)	A
5 kg de calcaire (à pulvériser) 4 kg de calcaire broyé (chaux dolomitique) 1,5 kg de superphosphate broyé (20 % de phosphore) 1 kg de sulfate de potassium 150 g d'oligo-éléments frittés (OEF302)	B
2,0 kg d'engrais 18-6-12 à action lente (9 mois)	C
2 kg de nitrate de potassium 0,3 kg de sulfate de magnésium 35 g de Borax (15 % de bore) 35 g de fer chélateur (AEDT*, 13 % de fer)	D
0,1 L d'un agent mouillant	E

Note Mélanger séparément les éléments de A et les éléments de B. Diluer D (mélangé) et E à 20 L d'eau chacun. Combiner A, B et C et mouiller avec les solutions D et E; ajouter plus d'eau au besoin pendant le mélange. Ce mélange devrait donner suffisamment de substrat pour remplir au moins 32 sacs de 35 cm sur 105 cm.

Culture dans la sciure

Au cours des années 1950 et 1960, les Stations de recherches de Saanichton et d'Agassiz ont mis au point une méthode de culture des tomates en serre dans la sciure. Cette méthode a été généralisée pour les cultures commerciales en Colombie-Britannique et un peu en Alberta au cours des années 1970 et 1980, mais la sciure est actuellement remplacée par la laine de roche. Parmi les avantages de la culture dans la sciure, mentionnons son coût peu élevé, sa légèreté et la grande disponibilité du matériau. La laine de roche possède également certaines de ces qualités, mais la sciure pourrait regagner la faveur des producteurs en raison du fait qu'il est plus facile de s'en défaire que la laine de roche.

La sciure utilisée jadis comme milieu de croissance était le résidu de sapins de Douglas et de pruches de l'Ouest. La sciure du cèdre de l'Ouest a des propriétés toxiques, surtout lorsqu'elle est fraîche, et il faut donc l'éviter. On peut mélanger à la sciure d'autres produits organiques ou

Tableau 16 Calendrier de fertigation pour les tomates cultivées en sac de tourbe (kilogrammes d'engrais par 1 000 L de solution-mère

Nombre de semaine après la plantation	Nitrate de calcium	Nitrate de potassium	Nitrate d'ammonium	Engrais de départ 10-52-10	Fer chélaté (13 % fer)	Phosphate de monoammonium	Sulfate de magnésium	L/jour	CE (µS/cm)
1, 2	0	0	0	40,0	0,0	0	0	0,4	5 000
3, 4	0	0	0	40,0	0,0	0	0	0,2	4 000
5, 6	0	90,0	0	0,0	0,0	20,0	9,0	0,4	3 500
7, 8	18,0	90,0	0	0,0	0,0	20,0	9,0	0,6	3 000
9, 10	18,0	90,0	0	0,0	0,0	40,0	9,0	0,8	2 500
11, 12	18,0	90,0	0	0,0	4,0	40,0	9,0	1,0	2 300
13, 14	18,0	90,0	50,0	0,0	4,0	40,0	9,0	1,2	2 200
15–18	36,0	90,0	50,0	0,0	4,0	40,0	18,0	1,4	2 000
19–22	36,0	90,0	50,0	0,0	4,0	40,0	18,0	1,4	2 000
23	36,0	90,0	50,0	0,0	4,0	40,0	0	1,4	1 500
24, 25	0	90,0	50,0	0,0	4,0	40,0	0	1,4	1 500

- Ajouter aussi des oligo-éléments à tous les engrais susmentionnés; une solution type d'oligo-éléments, p. ex. STEM, de Peters, renferme 1,45 % de bore, 3,2 % de cuivre, 7,5 % de fer, 8,15 % de manganèse, 0,046 % de molybdène et 4,5 % de zinc.
- Dissoudre une quantité donnée de chaque engrais, y compris les oligo-éléments, dans 1 000 L d'eau et ajouter à l'eau d'irrigation à doses égales au moyen d'un injecteur à têtes multiples. Commencer par injecter de très faibles doses, et augmenter progressivement jusqu'à ce que le degré de CE soit atteint. Amener le pH de la solution de fertigation à 5,5 en injectant une solution diluée d'acide phosphorique, nitrique ou sulfurique.
- Ne pas modifier le calendrier de fertigation pour une culture de printemps. Commencer à la semaine 4 pour une culture d'automne.
- Le titre recommandé des solutions-mères doit correspondre à la capacité de l'injecteur d'engrais ayant un taux de dilution de 1/100. Lorsque l'injecteur d'engrais a un taux de dilution de 1/200, doubler la quantité de chaque engrais. Des corrections semblables peuvent être faites lorsqu'on utilise des injecteurs ayant d'autres taux de dilution.

inorganiques pour améliorer les propriétés chimiques et physiques du substrat. Toutefois, les divers mélanges doivent être formulés et vérifiés à petite échelle dans des conditions bien maîtrisées. Les producteurs hésitent à utiliser ce produit principalement à cause de la vente libre de nombreux mélanges organiques qui présentent diverses caractéristiques chimiques et physiques, et cette situation constitue un obstacle à l'utilisation rentable de cette précieuse ressource canadienne.

La sciure peut être utilisée en bacs, en couches, en sacs, en bassins, ou même en gros pots. Quel que soit le contenant, il faut y placer au moins 10 L de sciure pour chaque plante. On utilise les mêmes pratiques culturales pour ce substrat que pour la tourbe.

L'engrais peut être appliqué de deux façons : fournir à chaque irrigation tous les éléments nutritifs dans la solution nutritive complète, ou incorporer une partie de l'engrais dans le milieu de croissance avant la plantation et fournir le reste par l'entremise du système d'irrigation.

Les doses d'engrais présentées au tableau 17 sont recommandées pour la production de tomates dans une sciure non fertilisée.

Tableau 17 Taux d'application d'engrais pour les tomates cultivées sur la sciure non fertilisée

Engrais	Taux d'azote dans la solution finale		
	126 ppm	168 ppm	210 ppm
	Quantité d'engrais dans la solution finale (en grammes par 1 000 L)		
Sulfate de potassium	360	44	–
Nitrate de potassium	160	500	550
Sulfate de magnésium	500	500	500
Nitrate d'ammonium	–	–	100
Nitrate de calcium	680	680	680
	Solution-mère (en mL)		
Solution-mère d'oligo-éléments*	220	220	220
Acide phosphorique (75 %)†	100	100	100

* Préparer la solution-mère d'oligo-éléments en faisant dissoudre les éléments suivants dans un litre d'eau chaude : 70 g de chélate de fer (10 % de fer), 15 g de sulfate de manganèse, 12 g d'acide borique, 2,2 g de sulfate de zinc, 0,6 g de sulfate de cuivre et 0,2 g d'acide molybdique. Lorsque cette solution-mère d'oligo-éléments est ajoutée à la solution nutritive finale à raison de 220 mL/L, la concentration d'oligo-éléments dans la solution nutritive finale, exprimée en parties par million, est la suivante : fer : 1,54 ppm; manganèse : 1,07 ppm; bore : 0,46 ppm; zinc : 0,11 ppm; cuivre : 0,034 ppm; et molybdène 0,023 ppm.

† L'acide phosphorique concentré (75 %) peut être ajouté avec précaution à la solution nutritive finale, sans dilution préalable.

Les doses d'engrais présentées au tableau 18 sont recommandées pour la production de tomates dans une sciure enrichie de 2,4 kg de superphosphate (0-19-0) et de 4 kg de chaux domolitique par mètre cube de sciure. Pour assurer la présence à long terme de calcium et de magnésium assimilables, la moitié de la chaux doit être broyée grossièrement et l'autre moitié doit être broyée finement.

L'application des doses d'engrais recommandées aux tableaux 17 et 18 peut se faire de deux façons : soit dissoudre les engrais dans l'eau aux taux prescrits et appliquer directement sur la plante la solution nutritive obtenue, soit préparer des solutions-mères concentrées (ex. 100 fois les doses prescrites) et incorporer ces solutions dans l'eau d'irrigation (en utilisant par exemple un injecteur d'engrais réglé pour injecter un volume d'engrais par cent volumes d'eau (1/100). Il ne faut jamais oublier que de fortes concentrations de calcium et de sulfate ne peuvent être mélangées sans provoquer une certaine précipitation de sulfate de calcium, et l'on doit donc préparer au moins deux solutions-mères.

Tableau 18 Taux d'application d'engrais pour les tomates cultivées sur la sciure enrichie

Engrais	Taux d'azote		
	126 ppm	168 ppm	210 ppm
	Quantité d'engrais dans la solution finale (en grammes par 1 000 L)		
Nitrate de potassium	550	550	550
Nitrate d'ammonium	160	280	410
	Solution-mère (en mL)		
Solution-mère d'oligo-éléments*	220	220	220
Acide phosphorique (75 %)†	100	100	100

* Préparer la solution-mère d'oligo-éléments en faisant dissoudre les éléments suivants dans un litre d'eau chaude : 70 g de chélate de fer (10 % de fer), 15 g de sulfate de manganèse, 12 g d'acide borique, 2,2 g de sulfate de zinc, 0,6 g de sulfate de cuivre et 0,2 g d'acide molybdique. Lorsque cette solution-mère d'oligo-éléments est ajoutée à la solution nutritive finale à raison de 220 mL/L, la concentration d'oligo-éléments dans la solution nutritive finale, exprimée en parties par million, est la suivante : fer : 1,54 ppm; manganèse : 1,07 ppm; bore : 0,46 ppm; zinc : 0,11 ppm; cuivre : 0,034 ppm; et molybdène 0,023 ppm.

† L'acide phosphorique concentré (75 %) peut être ajouté avec précaution à la solution nutritive finale, sans dilution préalable.

Chapitre 8 Culture dans la laine de roche et dans d'autres milieux inertes

La laine de roche est une matière fibreuse produite à partir d'une roche d'aspect granitique connue sous le nom de basalte (diabase). Durant sa fabrication, les minéraux sont fondus à une température d'environ 1 600 °C et transformés en fibres liées par des résines. Cette matière spongieuse a d'abord été fabriquée pour servir d'isolant dans l'industrie du bâtiment, mais on la produit depuis peu sous forme de cubes ou de matelas auxquels on ajoute un agent mouillant qui leur permet de retenir l'eau pour un usage horticole. Les autres produits inertes utilisés seuls ou conjointement comme substrat de croissance sont la perlite, la vermiculite, le polyuréthane (Oasis) et les granules de polystyrène. La vermiculite n'est pas entièrement inerte, puisqu'elle renferme une certaine quantité de potassium et de magnésium qui se décomposent et deviennent graduellement assimilables par les plantes. Toutes ces matières inertes sont fabriquées de la même façon que la laine de roche, et elles présentent les mêmes caractéristiques chimiques et physiques. Elles sont toutes stériles, c'est-à-dire exemptes d'agents pathogènes et de graines de mauvaises herbes, et elles ont une faible capacité d'échange cationique (sauf la vermiculite) et une grande capacité de rétention d'eau. Elles permettent une bonne aération des racines et une très bonne maîtrise de l'arrosage et de la nutrition. Elles sont légères et faciles à manipuler, ce qui permet de réduire les intervalles entre les cultures. Enfin, ces matières permettent de réaliser des économies du fait qu'il n'est pas nécessaire de les soumettre à l'étuvage et qu'il est désormais pratique de réchauffer la zone radiculaire, et on peut aussi maîtriser plus aisément la température de l'air en fonction des exigences calorifiques minimales des pousses plutôt que des racines.

La laine de roche est le milieu inerte le plus important en horticulture, car la vente de ce produit est très répandue dans le monde entier et divers producteurs d'expérience et spécialistes des plantes le connaissent bien et peuvent fournir de nombreux renseignements à son sujet (planche 3). Toutefois, si on utilise de bonnes méthodes, tous les médias précités ont d'aussi bonnes possibilités de rendement. Comme il existe une grande similitude dans la technologie applicable aux milieux inertes utilisés pour la production de tomates en serre, la procédure d'utilisation détaillée pour la laine de roche s'applique à tous les milieux de croissance, et certaines références à d'autres milieux peuvent être faites au besoin.

La laine de roche horticole est fabriquée dans plusieurs pays (Royaume-Uni, Danemark, Hollande, Allemagne, France, États-Unis, et récemment au Canada) sous diverses marques de commerce (Basalan, Capogro, Grodan, Pargro). La composition chimique de la laine de roche varie d'un fabricant à l'autre, mais les ingrédients qui composent les fibres ne sont pas assimilables par les plantes, et tous les éléments nutritifs doivent donc être ajoutés régulièrement dans une solution pour alimenter la plante.

La laine de roche est accessible sous forme de matelas, de blocs ou de granules. Les matelas sont rectangulaires et de dimensions variées, mais ils ont généralement une épaisseur de 7,5 cm pour la culture des plantes à croissance prolongée comme les tomates, les concombres, les poivrons et les aubergines. Les dimensions habituelles des matelas sont de 90 × 15 × 7,5 cm, de 90 × 20 × 7,5 cm et de 90 × 30 × 7,5 cm. Les blocs ont également diverses dimensions, et ils sont utilisés pour la germination des graines et pour la culture des transplants. La forme granulaire peut servir d'amendement pour le sol ou pour les mélanges sans sol, et on peut aussi l'employer en sac pour remplacer la tourbe en partie ou en totalité.

Le polyuréthane de marque Oasis se vend aussi en bloc pour la culture des transplants et sous forme granulaire pour la fabrication de mélanges en sac; il n'est pas encore produit sous forme de matelas. L'Oasis et la laine de roche ont un pH très différent. Celui de la laine de roche varie à peu près de 7 à 8,5 et, avant l'usage, il doit être ramené à environ 5,5 au moyen d'une solution fertilisante légèrement acide. Le pH du nouvel Oasis est plutôt acide et, avant d'utiliser ce produit, il faut ajouter une solution légèrement alcaline composée habituellement de bicarbonate de potassium. Pour les deux produits, la concentration exacte de la solution acide ou basique peut être déterminée au moyen d'essais à petite échelle, mais le fabricant peut également fournir l'information requise. La faible capacité d'échange cationique des milieux inertes rend simple et peu coûteuse la tâche de rectifier le pH, car les quantités de produits chimiques nécessaires sont peu considérables. Avant d'entreprendre la culture, le milieu de croissance doit être arrosé généreusement pour permettre la correction du pH, remplir les tubes capillaires et pour s'assurer que l'eau des irrigations ultérieures se répandra uniformément dans le milieu. On ajoute environ 800 mL d'eau pour chaque litre de laine de roche afin d'obtenir une saturation complète, ce qui indique bien sa grande capacité de rétention d'eau (80 %) et sa bonne aération (17 %), même lorsque le produit est détrempé.

Il est bon que la propagation et la culture de la plante se fassent dans le même type de milieu, car on s'assure alors que les liens capillaires entre le pot du transplant et le milieu de croissance sont rapidement établis à la transplantation, et qu'il ne se produit pas un trop grand assèchement ou une saturation en eau excessive autour de la tige. Les blocs de laine de roche sont vendus en plusieurs dimensions, mais pour les travaux de propagation de la tomate, on fait généralement appel aux cubes de 7,5 cm enrobés individuellement de polyéthylène pour prévenir un assèchement trop prononcé. On produit les plantules dans la vermiculite ou la perlite, pour ensuite les repiquer dans des blocs de laine de roche munis d'une cavité sur le dessus. On peut aussi produire des plantules en plaçant les graines une à une dans de très petits blocs de laine de roche (pastilles) qui sont spécialement modelés pour s'adapter à la cavité des blocs de transplantation, et les recouvrir avec une fine vermiculite. Avant d'utiliser les blocs de laine de roche, on doit les placer sur une feuille de polyéthylène et les arroser avec une solution nutritive acide pour rectifier le pH. Après avoir repiqué les plantules, appliquer une solution nutritive à chaque arrosage. Il est bon qu'une source de chaleur placée au-dessous élève la

température du substrat jusqu'à 22 à 24 °C, car cette mesure est toujours susceptible de favoriser une économie d'énergie.

La composition nutritive de la solution fertilisante utilisée pour la culture sur laine de roche dépend de la composition chimique de l'eau d'irrigation, de l'étape de croissance végétative et de la saison. Après avoir analysé l'eau qui doit être employée, on peut calculer les taux d'application d'engrais et de solution acide compte tenu du meilleur équilibre nutritif souhaitable déterminé par les travaux de recherche et la pratique. La qualité de l'eau d'irrigation est plus importante pour la culture dans la laine de roche que pour la culture dans le sol, et elle doit toujours entrer en ligne de compte pour l'établissement d'un programme de nutrition. Par exemple, lorsque l'eau renferme une grande quantité de calcium ou de magnésium, il faut réduire en conséquence les taux de nitrate de calcium et de sulfate de magnésium, et compenser l'azote perdu dans cette opération en augmentant la dose d'un autre engrais azoté. Les autres éléments nutritifs, comme le potassium et l'azote, sont rarement présents en quantité suffisante pour exiger une modification de la ration nutritive. L'eau utilisée renferme parfois une grande quantité d'oligo-éléments comme le fer, le zinc et le manganèse, et l'on doit alors apporter une certaine correction à la ration fertilisante. Ne pas employer d'eau saline parce qu'elle renferme plus de 50 ppm de sodium ou plus de 70 ppm de chlore; lorsque la concentration de ces deux ions atteint 100 et 140 ppm respectivement, l'eau ne peut être utilisée sans risque pour la culture dans la laine de roche. Lorsqu'on utilise l'eau de pluie, il faut élever le taux généralement bas de bicarbonate en ajoutant du bicarbonate de potassium à la solution finale, et non aux solutions-mères. On augmente ainsi le pouvoir tampon de la solution pour obtenir un pH plus stable dans les matelas de laine de roche. Par contre, lorsque le taux de bicarbonate dans l'eau utilisée est supérieur à 60 ppm, on doit ajouter de l'acide phosphorique ou nitrique (ou les deux) pour le neutraliser. Il est préférable d'obtenir un deuxième avis pour connaître la bonne solution à ces problèmes particuliers, de préférence auprès d'un producteur d'expérience ou d'un conseiller en horticulture. La culture sur laine de roche peut faire appel ou non à des systèmes de recirculation des solutions nutritives, mais le système sans recirculation est préférable en raison de sa simplicité et de sa fiabilité. Toutefois, même en l'absence de recirculation, il faut examiner et réparer régulièrement le système ouvert et vérifier quotidiennement le pH et la conductivité électrique de la solution, compte tenu du caractère inerte du substrat et de la réaction rapide de la plante lorsqu'il se produit une erreur humaine ou une défectuosité mécanique.

Une fois terminée la production de transplants, placer les plants sur les matelas de laine de roche en les faisant passer dans les trous déjà faits dans la gaine de plastique, et s'assurer que le contact est bon entre les blocs de propagation et les matelas. Installer un ou plusieurs égouttoirs dans le système d'irrigation de chaque bloc de propagation. Il serait peut-être préférable de placer les transplants sur les matelas de laine de roche pendant plusieurs jours avant de faire des trous dans la gaine de plastique. Cette mesure contribue à limiter la croissance des racines dans le bloc et à ralentir la croissance végétative en retenant l'eau au début de la production

de printemps, lorsque l'éclairement est limité. Une fois que les plants ont établi un bon système radiculaire dans les matelas, pratiquer des incisions pour le drainage sur les côtés de la gaine de plastique, près du bas. La distance entre les incisions et le bas des matelas de laine de roche détermine le volume de solution nutritive en réserve et joue un rôle primordial dans l'établissement des caractéristiques du système et du régime d'irrigation : plus les incisions sont basses, plus le réservoir de solution nutritive de chaque matelas est réduit et plus fréquente est l'irrigation nécessaire. Par contre, plus les incisions sont basses, moins le volume de laine de roche saturé est grand; ainsi on obtient un meilleur rendement en utilisant la laine de roche comme substrat d'enracinement, ce qui donne théoriquement une plus grande productivité. Dans le cas du producteur qui utilise pour la première fois la laine de roche et un système peu performant d'irrigation goutte-à-goutte, il vaut mieux qu'il commence par faire des incisions pour le drainage à une certaine distance (de 1 à 3 cm) du bas des matelas. Lorsqu'il a acquis une certaine expérience, il pratique progressivement des incisions plus bas pour utiliser au maximum la laine de roche disponible.

Les rangs de matelas de laine de roche doivent être le plus au niveau possible et, en les plaçant sur des plaques de polystyrène, on égalise les petites imperfections du sol. Ces plaques de polystyrène font aussi partie du système de chauffage du substrat, qui assure la circulation d'eau chaude par une canalisation en polyéthylène fixée dans des rainures creusées dans le polystyrène. Ces plaques servent également d'isolant entre les matelas de laine de roche chauds et le sol froid.

Préparer au moins deux solutions-mères avec des engrais facilement assimilables, afin de ne pas provoquer dans le réservoir de concentrés une précipitation qui découlerait du mélange d'engrais à base de calcium ou de magnésium avec des engrais à base de sulfate ou de phosphate. Diluer les solutions-mères et les réunir dans un réservoir de mélange avant de les appliquer sur les plantes, ce qui permet de fournir une solution nutritive complète à chaque arrosage. Surveiller continuellement avec un détecteur de sels (cellule de conductivité électrique) la concentration totale d'éléments nutritifs de l'eau d'irrigation, et modifier s'il y a lieu dans le mélange la proportion du diluant d'engrais afin d'obtenir la meilleure valeur nutritive possible pour la plante; il existe des dispositifs techniques qui peuvent apporter automatiquement cette modification. De même, on utilise un pH mètre pour vérifier le pH de l'eau d'irrigation après avoir ajouté tous les engrais et une solution acide au besoin. Régler le taux d'application de la solution acide pour obtenir le pH souhaitable dans la solution nutritive; il existe des dispositifs techniques qui apportent automatiquement cette correction. De nombreuses combinaisons nutritives sont possibles compte tenu du cultivar utilisé, de la source d'eau, du stade de croissance et de la saison. Les recommandations présentées au tableau 19 pour la fertigation sont fondées sur l'emploi de l'eau de pluie, et elles doivent uniquement servir de point de départ pour trouver la solution optimale à une culture donnée.

Il est essentiel de procéder chaque jour à la vérification du pH et de la concentration de sels dans la solution du matelas, et il est très recommandé de faire aux 15 jours une analyse de tous les éléments nutritifs essentiels. Les graves déséquilibres nutritifs doivent être corrigés en variant la solution nutritive de façon appropriée, mais les changements apportés doivent s'écarter le moins possible de la solution normale. Les modifications à la solution pourraient être revérifiées par une personne d'expérience et appliquées seulement pendant la période nécessaire pour corriger le déséquilibre. On peut aussi modifier la formule nutritive après avoir observé la croissance et l'aspect de la plante, mais ce genre de modification ne doit être apportée que par des personnes ayant l'expérience de la culture dans la laine de roche. On peut réduire les coûts en utilisant les matelas de laine de roche pendant plus d'une saison, à condition de bien les stériliser à la vapeur entre les cultures. Les sels accumulés doivent être complètement rincés avec de l'eau claire avant de procéder à la stérilisation pendant une heure ou deux. On peut aussi utiliser le bromure de méthyle pour stériliser la laine de roche entre les cultures, mais il est préférable de recourir à l'étuvage lorsque c'est possible puisqu'il permet d'éliminer un plus grand nombre d'agents pathogènes. Une fois que les matelas sont stérilisés, on les recouvre de nouveau d'une pellicule de polyéthylène et ils sont réutilisables. Ces matelas n'exigent pas d'autres corrections du pH, et ils sont plus faciles à réhumidifier que les matelas neufs. Les matelas peuvent seulement être réutilisés un nombre limité de fois, généralement une seule fois, car la structure des fibres est un peu endommagée par la manutention et la stérilisation, et il en résulte une diminution des espaces poreux à chaque réutilisation. Un autre moyen intéressant de réduire les coûts de production est d'utiliser le matelas de laine de roche à faible densité et peu coûteux qui a récemment été mis sur le marché et qui est utilisé une seule saison de culture.

D'autres milieux presque inertes (sable et gravier) ont aussi été utilisés comme substrat pour la culture des légumes en serre. De nombreux ouvrages en provenance d'autres pays traitent de la culture sur sable et sur gravier, et des producteurs canadiens ont occasionnellement mis cette culture à l'essai. Toutefois, il s'agit de milieux de croissance lourds et difficiles à manipuler et à stériliser entre les cultures, et il faut généralement apporter des modifications permanentes et considérables au plancher de la serre pour être en mesure de les utiliser. Comme la plupart des autres milieux, le sable et le gravier peuvent donner d'aussi bons rendements lorsqu'ils sont bien traités, et ils peuvent constituer le meilleur choix dans certaines conditions.

Tableau 19 Calendrier de fertigation des tomates cultivées sur laine de roche (kilogrammes d'engrais par 1 000 L de solution-mère

Période d'application	Solution-mère A		Solution-mère B			Irrigation recommandée	
	Nitrate de calcium	Nitrate de potassium	Phosphate de monopotassium	Sulfate de potassium	Sulfate de magnésium	L/jour	CE (µS/cm)
Saturation des matelas	130,0	0	27,0	43,0	36,0		2 500
De 4 à 6 semaines après la plantation	100,0	64,0	27,0	12,0	36,0	0,2–1,0	augmenter graduellement jusqu'à 3 500
Alimentation normale	100,0	35,0	27,0	39,0	36,0	1,0–2,5	1 800–2 300
Fructification abondante	100,0	37,0	27,0	42,0	36,0	1,5–3,5	1 800–2 500

- Ajouter aussi des oligo-éléments à tous les engrais susmentionnés, p. ex. 0,7 kg de STEM et 0,5 kg de chélate de fer (13 % de fer); une solution type d'oligo-éléments comme le STEM de Peters, renferme 1,45 % de bore, 3,2 % de cuivre, 7,5 % de fer, 8,15 % de manganèse, 0,046 % de molybdène et 4,5 % de zinc.
- Dissoudre une quantité donnée de chaque engrais, y compris les oligo-éléments, dans 1 000 L d'eau et ajouter à l'eau d'irrigation à doses égales au moyen d'un injecteur à têtes multiples. Commencer par injecter de très faibles doses, et augmenter progressivement jusqu'à ce que le degré de CE soit atteint. Amener le pH de la solution de fertigation à 5,5 en injectant une solution diluée d'acide phosphorique, nitrique ou sulfurique.
- Le titre recommandé des solutions-mères doit correspondre à la capacité de l'injecteur d'engrais ayant un taux de dilution de 1/100. Lorsque l'injecteur d'engrais utilisé a un taux de dilution de 1/200, doubler la quantité de chaque engrais. Des corrections semblables peuvent être faites lorsqu'on utilise des injecteurs ayant d'autres taux de dilution. Dans le cas où la limite de solubilité d'un engrais (p. ex. le sulfate de potassium) est dépassée, on peut préparer plus d'une solution-mère avec le même engrais et répartir l'engrais en quantité égale entre les solutions-mères.

Note : Lorsqu'on mélange une partie de A, une partie de B et 98 parties d'eau, on obtient tous les éléments essentiels à la culture aux concentrations suivantes en parties par million.

	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B	Mo
Saturation des matelas	201	62	253	247	36	0,8	0,57	0,32	0,22	0,1	0,005
De 4 à 6 semaines après la plantation	238	62	370	190	36	0,8	0,57	0,32	0,22	0,1	0,005
Alimentation normale	200	62	370	190	36	0,8	0,57	0,32	0,22	0,1	0,005
Fructification abondante	203	62	390	190	36	0,8	0,57	0,32	0,22	0,1	0,005

Chapitre 9 Culture sur film nutritif et autres systèmes de culture hydroponique

De toutes les méthodes de culture sans sol, la culture sur film liquide est par définition un véritable système hydroponique. La culture sur film nutritif (NFT) est un nouveau système de culture hydroponique fondé sur le simple principe de faire circuler un mince courant ou film de solution nutritive sur les racines des plantes en croissance pour leur fournir une quantité suffisante d'eau, d'éléments nutritifs et d'oxygène (fig. 14). La conception du film nutritif est attribuée à M. A.J. Cooper; lorsqu'il travaillait au Glasshouse Crops Research Institute de Littlehampton, Angleterre, il a constaté la valeur de ce système et il attirait déjà en 1973 l'attention internationale sur ses possibilités commerciales. La NFT a été soumise depuis à des essais exhaustifs menés par des chercheurs et des producteurs commerciaux de nombreux pays, dont le Canada, et elle est désormais considérée comme une méthode commerciale rentable de culture hydroponique.

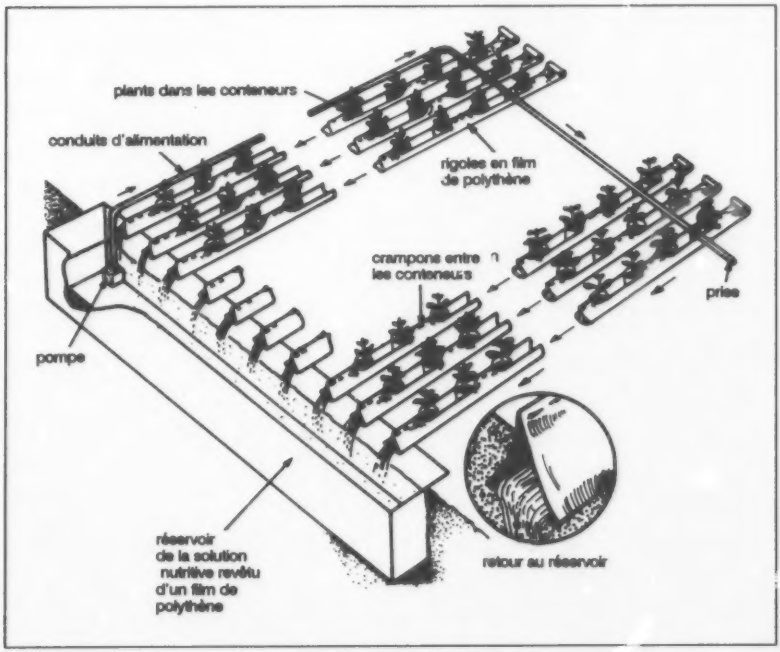

Fig. 14 La culture sur film nutritif (NFT).

Il existe de nombreuses versions de la NFT actuellement en usage, mais les éléments de base d'une installation type sont les suivants :

- Des rigoles parallèles ayant une inclinaison de un à deux degrés où sont implantés les végétaux et dans lesquelles coule la solution nutritive. Dans les premiers systèmes, les racines des plantes reposaient dans une canalisation aplatie, mais cette méthode ne permettait pas la meilleure aération des racines et l'on a ensuite utilisé des rigoles fabriquées avec une feuille de polyéthylène pliée dans le sens de la longueur (fig. 15). Les rigoles sont actuellement préfabriquées avec du plastique semi-rigide.
- Un bassin collecteur qui renferme la solution nutritive, à laquelle on ajoute les engrais, l'eau et l'acide.
- Une pompe de circulation qui puise la solution dans le bassin collecteur et l'amène à la tête des rigoles.
- Un tuyau collecteur qui reçoit la solution provenant des rigoles et l'amène finalement au bassin collecteur.
- Des réservoirs pour l'engrais et l'acide qui entreposent les solutions-mères d'engrais et la solution acide.
- Le matériel de surveillance et de contrôle qui régularise les concentrations nutritives (y compris la quantité totale de sels), le pH et le niveau d'eau. Un régulateur de conductivité électrique et un régulateur de pH sont fréquemment utilisés pour régulariser le fonctionnement des pompes doseuses ou des vannes solénoïdales. Ces pompes et vannes règlent le transfert des engrais et de la solution acide au bassin collecteur. Il est facile de maintenir un niveau d'eau constant dans le bassin collecteur en utilisant une vanne mécanique à flotte ou divers dispositifs de commande électroniques.

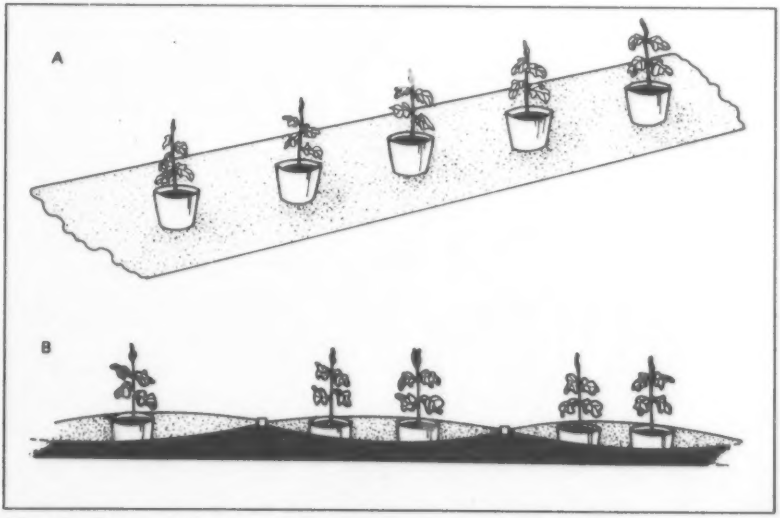

Fig. 15 Construction de rigoles pour la culture sur film nutritif.

La figure 16 expose la configuration générale d'une installation NFT et des divers éléments précités.

La culture sur film nutritif présente de nombreux avantages par rapport à d'autres systèmes de production végétale. Ses critères de conception sont la simplicité, le faible coût et la fiabilité. Elle favorise surtout une maîtrise absolue de la zone où baignent les racines. L'arrosage est grandement simplifié, et toute la culture reçoit une quantité uniforme de solution nutritive. On peut facilement élever la température des racines en chauffant la solution nutritive, qui peut être circulée sans arrêt ou par intermittence pour économiser davantage l'énergie et contrôler la croissance végétale des jeunes plants cultivés en hiver. Le système présente d'autres avantages comme la brève période nécessaire entre les cultures successives, un meilleur usage de l'espace de serre en raison de la mobilité possible des plantes, et la possibilité de faire un usage plus rationnel de l'eau. Comme la NFT permet de très bien maîtriser la nutrition, l'apport d'eau et la zone radiculaire, elle est considérée comme le plus perfectionné de tous les systèmes de culture commerciaux actuellement en usage et comme celui qui offre les plus grandes possibilités de rendement; des essais pratiques ont confirmé cette réputation. Toutefois, d'autres méthodes de culture sans sol comportent plusieurs avantages associés à la NFT, notamment la culture dans la laine de roche. On entretient donc beaucoup de réserve quant à l'avenir de la NFT, car elle est généralement considérée comme une méthode qui exige une compétence technique supérieure. On craint que la recirculation de la solution nutritive favorise le développement et la propagation de maladies dans le système ce qui entraînerait des pertes désastreuses. Il n'existe aucun exemple de pertes catastrophiques dans les faits, mais des cas inexplicables de destruction des

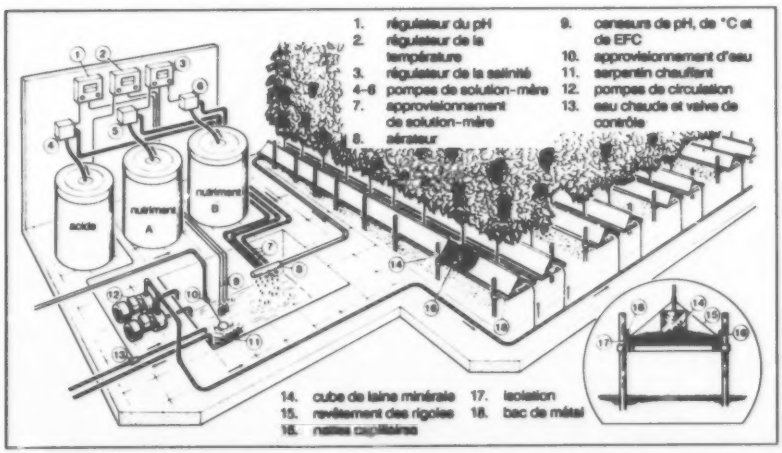

Fig. 16 Installation type pour la culture sur film nutritif.

racines se sont produits à l'occasion et ont alimenté la crainte qu'une propagation éventuelle de maladies puisse se produire dans la culture avec film nutritif.

La NFT, la technique de culture en profondeur (expérimentée pour la première fois au Japon, planche 4) et d'autres méthodes de culture hydroponique avec recirculation suscitent actuellement un regain d'intérêt fondé sur leur aptitude à réduire les pertes d'engrais et la pollution environnementale.

La NFT a été originalement conçue comme un système peu coûteux qui utilise des rigoles légères et jetables ainsi que de simples régulateurs de la salinité et du pH. Toutefois, à mesure que le système se transformait en produit commercial, il s'est ajouté des éléments d'automatisation, de standardisation et de perfectionnement qui ont rendu presque prohibitif le coût d'installation de la technique pour les producteurs qui envisageaient d'y recourir. De plus, il faudrait probablement importer au Canada un système NFT commercial homologué, ce qui rendrait l'installation encore plus coûteuse. Heureusement, le système NFT original, simple et peu coûteux, est presque aussi efficace que les modèles coûteux et préfabriqués vendus sur le marché international, et ils constituent encore la meilleure perspective pour le producteur moyen qui veut essayer la NFT à petite échelle sans risquer de grandes pertes. On peut se procurer de nombreux manuels et bulletins qui donnent une description très détaillée de la NFT. En outre, plusieurs entreprises canadiennes offrent actuellement des systèmes clé en main ou possèdent de grandes quantités d'instruments et de matériel applicables à la NFT. Le résumé suivant des règles et recommandations générales pour l'utilisation de la NFT s'adresse aux personnes n'ayant pas accès aux publications spécialisées qui décrivent le système plus en détail. On souligne les aspects de la NFT qui ont soulevé des problèmes durant sa mise au point.

La base des rigoles doit être d'environ 25 à 30 cm de largeur. On recommande une longueur maximale de 20 m pour les rigoles dont l'inclinaison nominale est de 1 %; de plus longues rigoles peuvent être utilisées pour la solution nutritive lorsque l'inclinaison est plus forte ou que plusieurs points d'introduction sont pratiqués le long des rigoles. On peut fabriquer les rigoles, surtout pour les cultures d'automne, avec un film coextrudé de polyéthylène (blanc sur noir) de 0,1 mm d'épaisseur. Une bande de film plastique d'environ 75 cm de largeur est placée, côté noir vers le haut, sur la surface de support préparée (c'est-à-dire les plaques de polystyrène sur le sol nivelé ou les supports à plateaux surélevés faits de métal galvanisé et d'autres matériaux), et les côtés de la bande sont relevés et brochés ensemble entre les plantes pour former une rigole triangulaire. La surface noire du plastique se trouve à l'intérieure et empêche la lumière de pénétrer dans la rigole, ce qui empêche la formation d'algues dans la solution nutritive; le côté extérieur blanc du plastique réfléchit la lumière, ce qui favorise la croissance des plantes et empêche le plastique de devenir trop chaud. On a déjà observé que la tige de certains transplants avait été brûlée par le plastique trop chaud lorsqu'une culture avait débuté en été. Comme on l'a déjà recommandé, il est préférable d'utiliser un film de plastique mince plutôt qu'un film épais, car le film mince a tendance à

plisser et contribue ainsi à disperser la solution nutritive pendant que la plante est en train de s'établir et que le nombre de racines qui poussent à l'extérieur des blocs de propagation n'est pas suffisant. Diverses méthodes ont été mises au point pour empêcher les jeunes transplants de s'assécher durant les quelques jours qui suivent la transplantation. Une solution simple et efficace consiste à placer les jeunes plants sur une bande étroite de treillis capillaire au moment de la transplantation. Il faut généralement placer à faible hauteur un deuxième ensemble de fils de support pour les plantes, afin de pouvoir déposer la culture sans déplacer les rigoles de plastique, une tâche qui entraînerait de grandes pertes de solution nutritive. Pour le transfert de la solution nutritive entre la ligne d'approvisionnement et les rigoles, on utilise au moins deux tubes flexibles de petit calibre (de 2 à 3 mm d'ouverture) pour prévenir tout colmatage. Il est préférable que le plus grand nombre possible de composants de la NFT qui entrent en contact avec la solution nutritive soient fabriqués en plastique, car les pièces métalliques peuvent libérer dans la solution certains oligo-éléments, comme le zinc et le cuivre, à des taux qui pourraient être toxiques. Devant l'abondance des matières plastiques, il faut prendre soin de ne pas choisir de produits qui sont phytotoxiques. On recommande en général d'utiliser des pièces faites en chlorure de polyvinyle (PVC) et en polyéthylène ou en polypropylène de basse et haute densité, mais il ne faut pas utiliser pour la culture sur film nutritif le PVC plastifié qui entre dans la fabrication des boyaux flexibles ou les garnitures de caoutchouc butylique utilisées pour imperméabiliser les réservoirs, car ils peuvent être phytotoxiques. Les matières plastiques sont plus susceptibles d'être phytotoxiques lorsqu'elles sont neuves. Les surfaces de plastique perdent rapidement leurs propriétés phytotoxiques lorsqu'elles entrent en contact avec la solution nutritive. Il faut donc nettoyer à fond pendant une journée toute la nouvelle installation de culture hydroponique avec une solution nutritive diluée que l'on jette avant de procéder à la plantation.

Pour assurer une bonne aération des racines, le débit dans les rigoles doit être suffisant (ex. 2 L/min) et la solution doit couler à moins de 1 cm de profondeur, même lorsque le tapis de racines est bien établi. Pour obtenir une inclinaison convenable, bien égaliser la surface avant de poser les rigoles pour éviter que la solution stagne dans des zones plus profondes. À la planification de l'aménagement, tirer profit de toute déclinaison naturelle dans la serre. Une seconde déclinaison, placée à angle droit par rapport aux rigoles favorise le retour du liquide au réservoir collecteur principal, dont l'emplacement le plus pratique est l'endroit le plus bas de la serre. Les premières installations qui ont utilisé la NFT étaient placées sur les surfaces du sol inclinées et parfois revêtues de béton, mais on s'intéresse de plus en plus aux systèmes surélevés avec supports ajustables et plates-formes rigides pour soutenir les rigoles. On évite ainsi les défauts de nivellement comme des cuvettes qui retiennent la solution, en plus de pouvoir régler l'inclinaison, même durant la culture. De plus, un système surélevé peut être installé et utilisé dans une vieille serre, où le nivellement du sol pourrait s'avérer difficile et même impossible. Divers contenants de fibre de verre ou de plastique ont été utilisés comme bassin collecteur, mais

leur volume généralement faible les limite aux installations modestes de culture sur film nutritif. Pour les grands systèmes, on utilise parfois des trous ou des puits profonds creusés dans le sol et tapissés d'un film de polyéthylène. Cette méthode n'est cependant pas recommandée, car il arrive souvent que la pellicule se perfore et engendre d'autres problèmes. Il vaut beaucoup mieux utiliser un puits garni d'une pellicule de polyéthylène renforcé de fibre de verre ou de fibre de nylon.

Dans la plupart des installations de culture sur film nutritif, un excellent bassin collecteur permanent peut prendre la forme d'un réservoir de béton bien étanché avec de la résine ou d'un réservoir préfabriqué en plastique et muni d'un renforcement externe. Le réservoir doit être recouvert pour ne pas laisser pénétrer la lumière, afin de prévenir la formation d'algues et d'empêcher la contamination de la solution par les organismes du sol. Une bonne isolation du bassin collecteur empêche la solution de trop refroidir et permet de conserver l'énergie lorsque la solution nutritive est réchauffée. Un système de culture sur film nutritif qui alimente 1 ha de plantes grimpantes matures devrait contenir environ 50 m^3 de solution nutritive; de 5 à 8 m^3 de cette solution se trouvent dans le bassin collecteur, et le reste du liquide circule dans les rigoles. On doit donc prévoir un bassin collecteur d'au moins 10 m^3 par hectare de serre lorsqu'on conçoit un système NFT; quand on prévoit un débit intermittent de solution nutritive, il faut augmenter considérablement la capacité du bassin. Les grands bassins permettent naturellement d'accroître la quantité de solution nutritive et la stabilité du pH, mais il faut aussi considérer le rapport coûts/avantages avant de prendre une décision finale. Comme pour tous les autres aspects de la NFT, on cherche constamment à perfectionner le bassin collecteur afin d'améliorer le mélange et l'aération de la solution nutritive et de permettre un contrôle optimal du pH et de la conductivité électrique. Diverses méthodes ont été mises au point pour augmenter encore l'oxygénation de la solution nutritive. Il est possible d'installer deux tuyaux de retour distincts qui pénètrent dans le bassin collecteur à angle droit l'un par rapport à l'autre, de façon que le courant de la solution nutritive converge bien au-dessus de la solution dans le bassin. De plus, à la place d'utiliser un tuyau ouvert pour décharger la solution nutritive dans le bassin de réception, on pourrait ajouter un raccord en T ou modifier autrement le tuyau pour favoriser la dispersion du liquide. Un moyen plus structuré d'améliorer le mélange et l'aération de la solution nutritive dans le bassin collecteur consiste à retourner directement sous pression une partie de la solution nutritive qui est pompée par la pompe principale de circulation. Comme toute composante qui entre en contact avec la solution nutritive, le matériau de la pompe principale doit être de l'acier inoxydable ou du plastique afin de résister aux solutions corrosives. Les pompes à amorçage automatique sont recommandées, mais il faut proscrire les pompes immergées qui finissent par se corroder et par causer des pannes. L'utilisation de plusieurs petites pompes à la place d'une seule grosse pompe permet de maintenir le débit lorsqu'une pompe fait défaut. On peut aussi installer une pompe de réserve qui est automatiquement mise en marche par suite d'une variation de pression, afin qu'elle prenne la relève lorsque la pompe principale s'arrête et qu'il se produit une chute de

pression dans le système. Pour se protéger contre une panne d'électricité totale, le générateur de secours est absolument nécessaire dans les grandes installations et dans les régions où les pannes d'électricité sont fréquentes et prolongées. Le petit exploitant peut éviter cette dépense supplémentaire en reliant au système NFT la conduite d'eau principale au moyen d'une vanne unidirectionnelle, ce qui permet au moins de maintenir le débit d'eau claire pendant une panne d'électricité. Cette mesure doit cependant être considérée uniquement comme un élément de sécurité supplémentaire intégré au système NFT, et non comme une première mesure de protection contre une panne d'électricité ou de pompe.

Relier le bassin collecteur à un réservoir de trop-plein dont la capacité est au moins équivalente au volume maximal de solution nutritive qui retourne au bassin collecteur après avoir alimenté les plantes. L'installation de ce réservoir de trop-plein peut sembler coûteuse et compliquée, mais elle est absolument nécessaire comme dernière mesure de protection pour éviter une inondation désastreuse après l'échec de toutes les autres mesures de sécurité établies pour maintenir le débit de la solution nutritive.

Les engrais et l'acide sont normalement ajoutés au bassin collecteur sous forme de solution-mère. Les pompes doseuses utilisées pour injecter les éléments nutritifs et les acides dans le bassin collecteur doivent être à l'épreuve des produits chimiques, du moins les pièces de ces pompes qui entrent en contact avec les solutions relativement concentrées. Il faut prévoir deux pompes pour les engrais et une pompe pour l'acide. Leur taille dépend de la taille de l'exploitation, mais la plupart des producteurs doivent compter sur une capacité moyenne de 10 L/h. Les deux pompes utilisées pour l'injection d'engrais doivent être ajustables, afin de pouvoir les régler pour qu'elles fournissent exactement le même volume de liquide. Le fonctionnement des pompes pour l'injection d'engrais et d'acide est commandé par leurs régulateurs respectifs. Dans les grandes installations, il pourrait s'avérer plus économique de remplacer les pompes doseuses par des vannes solénoïdales qui règlent l'écoulement par gravité de la solution-mère. Plusieurs fabricants offrent actuellement des ensembles complets de dosage des éléments nutritifs et des acides. Toutefois, les producteurs peuvent facilement se construire un système qui convienne à leurs besoins, car la plupart des composantes nécessaires sont facilement accessibles. En plus des trois pompes doseuses, il faut se procurer des régulateurs de salinité et de pH. Le régulateur de salinité est le meilleur moyen de déterminer la concentration des sels, car il mesure et règle la conductivité électrique de la solution. Cette méthode est fondée sur le principe que la conduction d'électricité entre deux électrodes immergés à une distance fixe (généralement 1 cm) dans une solution est proportionnelle à la concentration ionique totale (sels) de cette solution. Le régulateur de conductivité électrique vérifie et indique la conductivité de la solution nutritive, et il met en marche les pompes doseuses lorsque la conductivité mesurée tombe au-dessous d'une valeur établie et il ne les arrête qu'au moment où la solution est de nouveau à cette valeur établie. La conductivité électrique est généralement en microSiemen par centimètre (μS/cm) ou en micromho par centimètre (μmho/cm). D'autres unités et

conventions sont parfois utilisées pour exprimer la conductivité électrique, mais les rapports entre eux sont proportionnels; par exemple, 1 milliSiemen (mS) = 1 millimho (µmho) = 1 000 microSiemen (µS) = 1 000 micromho (µmho) = 10 unités de facteur de conductivité; les centimètres sont une valeur habituellement omise mais implicite. Comme les cellules (détecteurs) utilisées pour la mesure de la conductivité sont enrobées de plastique, elles sont robustes et n'exigent qu'un entretien minimal. Il existe deux grands types de cellules de conductivité : une cellule immergée dans la solution et appropriée pour une petite installation, et une cellule de lecture placée sur la ligne d'alimentation. Dans ce dernier cas, une boucle d'échantillonnage est disposée de façon à retourner directement dans le bassin collecteur une partie de la solution de sortie après qu'elle soit passée dans la cellule de conductivité. Lorsque la température s'élève, la conductivité électrique d'une solution augmente d'environ 2 % par degré Celsius. Le régulateur de conductivité doit donc être muni d'un système automatique de compensation de la température, ce qui est généralement le cas. Il est difficile de faire une recommandation générale concernant le réglage optimal de la conductivité sur le régulateur de salinité, car le réglage peut varier en fonction du cultivar utilisé, de la saison, du stade de croissance et de la qualité de l'eau. Le producteur doit d'abord mesurer la conductivité électrique de l'eau (lecture x) et régler le régulateur de salinité à x + 1 500 µS; une solution nutritive équilibrée pour la plupart des plantes a une conductivité d'environ 1 500 µS. Il se crée inévitablement une accumulation de certains éléments nutritifs lorsque l'eau d'approvisionnement contient trop d'éléments pour la plante ou lorsque les engrais ne sont pas fournis à un taux proportionnel à la capacité d'assimilation de la plante. Les éléments nutritifs qui peuvent s'accumuler avec le temps sont le calcium (eau dure), le sulfate (engrais), le sodium et le chlore (eau saline), et peut-être quelques autres. Dans ces conditions, la conductivité du milieu augmente progressivement et il faut élever proportionnellement le réglage de la conductivité électrique du régulateur de salinité pour maintenir un apport suffisant d'éléments nutritifs. Malheureusement, il n'existe pas de méthode simple et pratique pour déterminer les changements survenus dans la conductivité du milieu; il faut donc se débarrasser de la solution nutritive après un certain temps et la remplacer par une nouvelle solution. La fréquence de ce renouvellement dépend du stade de croissance et de la saison, car ces deux facteurs influent sur le taux d'assimilation par la plante des éléments nutritifs et de l'eau. En général, il faut renouveler la solution chaque mois au début de la culture et ensuite deux fois par mois lorsque la plante est complètement développée, ou chaque fois que la plante présente des signes d'arrêt de croissance. La solution peut être renouvelée moins souvent lorsque le producteur est plus familier avec le système. En période de rodage du système NFT, il est essentiel de faire chaque semaine des analyses chimiques de la solution nutritive pour protéger la plante et familiariser le producteur avec le système, mais les analyses peuvent être espacées après un certain temps et être faites aux deux semaines par exemple. Le pH de la solution nutritive a aussi une grande incidence sur la croissance, et il faut régulièrement le vérifier et le régulariser; un pH compris entre 5,5 et 6,5 est acceptable. On ne doit pas laisser le pH

descendre au-dessous de 5, et un pH inférieur à 4 endommage la plupart des plantes. À l'autre extrémité de l'échelle du pH, le taux d'oligo-éléments assimilables par les plantes (sauf le molybdène) diminue lorsque le pH est supérieur à 6,5, ce qui en fait la limite supérieure du pH souhaitable de la solution. Lorsque la principale source d'azote est un nitrate ou que le pH de l'eau est élevé (plus de 7), le pH de la solution nutritive augmente pendant la culture. Un système de contrôle se compose d'un indicateur-régulateur de pH et d'une pompe doseuse qui injecte un acide phosphorique ou nitrique. Par contre, lorsqu'une grande partie de l'azote est fourni sous forme d'ammoniaque et que le pouvoir tampon de l'eau est faible, il se peut que le pH tombe au-dessous de la limite inférieure acceptable et qu'il faille ajouter une base, comme l'hydroxyde de sodium, pour élever de nouveau le pH à un niveau acceptable. **Les acides et les bases peuvent causer de graves brûlures aux personnes qui les manipulent sans faire attention; et il faut toujours porter des vêtements protecteurs, un masque et des lunettes lorsqu'on utilise ces produits chimiques**. Les acides concentrés à l'achat doivent être dilués à raison de une partie d'acide pour dix parties d'eau, ou encore mieux de une partie d'acide pour vingt parties d'eau avant l'usage; la concentration exacte requise varie selon la capacité de la pompe ou de la vanne doseuse et d'après la taille du bassin collecteur. **Pour diluer des produits chimiques concentrés, on ajoute toujours l'acide ou la base à l'eau; on n'ajoute jamais l'eau à un produit concentré, car la solution peut alors surchauffer, exploser et causer de graves brûlures**. Lorsqu'il s'agit d'une grande installation, il vaut mieux demander l'avis d'un ingénieur chimiste spécialisé dans la conception des bonnes méthodes d'entreposage et de manutention des produits chimiques dangereux.

Il existe un grand nombre de dispositifs de sécurité et de mesures de protection en cas de panne des régulateurs de pH et de salinité. Le système comprend habituellement des minuteries qui peuvent neutraliser les deux régulateurs et empêcher l'apport ininterrompu d'engrais ou d'acide à la solution pendant des périodes supérieures à la normale. De plus, on peut utiliser de petits bassins pour recevoir les solutions-mères et les solutions acides afin de ne pas endommager la plante, même si tout le contenu de ces bassins venait s'ajouter au bassin collecteur; l'inconvénient de cette méthode est d'avoir à remplir régulièrement les bassins de solution-mère.

Les essais menés au Glasshouse Crops Research Institute (GCRI) de Littlehampton, Angleterre, ont montré que les plantes cultivées sur film nutritif peuvent tolérer une grande diversité de concentration nutritive. Par exemple, une des études a révélé que la perte de rendement était négligeable lorsque la concentration d'azote (sous forme de NO_3^-) était réduite de 320 à 10 ppm, pourvu que les concentrations étaient effectivement maintenues. Pour la culture commerciale toutefois, on préfère maintenir une grande concentration de solution nutritive afin de conserver une bonne réserve d'éléments nutritifs dans le système. De plus, la solution-mère contribue parfois à ralentir une trop grande croissance végétale en exerçant un stress osmotique.

Le tableau 20 présente quelques recommandations générales sur la concentration optimale d'éléments nutritifs dans la solution utilisée avec la NFT, et elles sont fondées sur l'expérience commerciale et sur les travaux de recherche exécutés au GCRI.

Compte tenu de la teneur en éléments nutritifs de la source d'eau, deux grandes recommandations sont faites en ce qui concerne la composition des solutions-mères d'engrais et d'acide qui entrent dans le système NFT. Les formules d'engrais présentées au tableau 21 ne s'appliquent qu'aux endroits où l'eau est modérément dure et dont l'alcalinité dépasse l'équivalent de 100 ppm de carbonate de calcium.

Tableau 20 Concentration cible d'éléments nutritifs pour la culture des tomates sur film nutritif

Élément	Minimum* (pH 5,5, CE 1 800 µS)	Optimum (pH 6,0, CE 2 000 à 2 500 µS)	Maximum (pH 6,5, CE 3 500 µS)
Azote nitrique (NO_3^-)	50	150–200	300
Azote ammoniacal (NH_4^+)	5	10–15	20
Phosphore	20	50	200
Potassium	100	300–500	800
Calcium	125	150–300	400
Magnésium	25	50	100
Fer	1,5	6	12
Manganèse	0,5	1	2,5
Cuivre	0,05	0,1	1
Zinc	0,05	0,5	2,5
Bore	0,1	0,3–0,5	1,5
Molybdène	0,01	0,05	0,1
Sodium	†	†	250
Chlore	†	†	400
Soufre	–	50–200	–

* Les concentrations indiquées sous Minimum doivent être considérées comme les concentrations situées au bas de l'échelle; en général, ces valeurs minimales sont supérieures à la limite au-dessous de laquelle des symptômes de carence se manifestent.

† Aussi peu que possible.

Lorsque l'analyse régulière de la solution nutritive indique que le calcium s'est accumulé dans la solution, il peut s'avérer nécessaire de réduire la quantité de nitrate de calcium dans la première solution-mère. Pour chaque kilogramme de nitrate de calcium prélevé de la première solution, on ajoute 0,86 kg de nitrate de potassium pour compenser la perte de NO_3^- par suite de la réduction du nitrate de calcium, et on réduit de 0,74 kg le sulfate de potassium pour compenser l'augmentation de potassium par suite d'une addition de nitrate de potassium. Il se peut que la source d'eau renferme suffisamment de calcium, par exemple plus de 120 ppm, et qu'il ne soit pas nécessaire d'ajouter du nitrate de calcium.

Toutefois, aux endroits où la source d'eau présente une alcalinité dont l'équivalent de carbonate de calcium est inférieur à 100 ppm, il faut augmenter le nitrate de calcium dans la première solution-mère. Les proportions d'engrais sont alors modifiées, comme il est indiqué au tableau 22.

L'agencement des engrais et des acides présenté aux tableaux 21 et 22 peut être modifié pour inclure une partie ou la totalité du nitrate de potassium dans la première solution-mère, une mesure peut-être souhaitable lorsque la quantité de nitrate de calcium ajoutée n'est pas importante. En outre, lorsqu'on peut déterminer le besoin en acide à partir de l'expérience passée, une partie de cet acide (mais seulement sous forme nitrique) peut être incorporée aux première et deuxième solutions-mères. Cette mesure a le double avantage d'empêcher la formation de précipités dans les première et deuxième solutions et de permettre que la teneur en azote de l'acide nitrique soit prise en compte au moment de formuler les solutions-mères. De fait, les engrais peuvent être agencés de diverses façons dans les solutions bien équilibrées, et la seule restriction est de ne pas faire entrer le calcium en contact avec le phosphate et le sulfate.

Les formules présentées aux tableaux 21 et 22 montrent bien que la composition des concentrés nutritifs peut être modifiée à des fins particulières. Les débutants qui ne veulent ou ne peuvent pas préparer leurs propres solutions-mères ont toujours la possibilité d'acheter diverses formules nutritives toutes prêtes. Ces produits commerciaux sont naturellement prévus pour une application universelle et ne constituent pas nécessairement un choix idéal pour chaque culture, mais ils donnent de bons résultats en général. Par contre, les producteurs commerciaux de tomates qui recourent à la culture sur film nutritif pour une grande partie de leur production doivent faire en sorte d'obtenir et de mélanger les engrais de base en s'inspirant des plus récents travaux de recherche pour fournir aux plantes la meilleure solution nutritive possible. On présente au tableau 23 les toutes dernières recommandations applicables à la solution fertilisante utilisée dans la culture de la tomate sur film nutritif.

Tableau 21 Formule d'engrais pour la culture sur film nutritif dans les régions où l'eau est dure*

Solution-mère 1 Volume total 1 000 L	Solution-mère 2 Volume total 1 000 L	Solution-mère 3 Volume total 1 000 L
50 kg de nitrate de calcium	80 kg de nitrate de potassium	54 L d'acide nitrique (67 %)
	40 kg de sulfate de potassium 60 kg de sulfate de magnésium 0,6 kg de nitrate d'ammonium 3,0 kg de fer chélaté (15 % de fer) 0,4 kg de sulfate de manganèse 0,2 kg d'acide borique 80 g de cuivre 40 g de sulfate de zinc 10 g de molybdate d'ammonium	24 L d'acide phosphorique (85 %)

* Aucun engrais phosphaté, à l'exception de l'acide phosphorique, n'est inclus dans la solution-mère 3. Lorsque l'eau n'est pas particulièrement dure et que le besoin d'acide est proportionnellement faible, ajouter 1,5 kg de phosphate de monopotassium dans la solution-mère 2 et diminuer la quantité de sulfate de potassium de 4 à 3 kg.

Note : En supposant que le rapport de dissolution est de 1/100 pour les solutions-mères 1 et 2, les concentrations d'éléments nutritifs dans la solution du film nutritif seraient théoriquement les suivantes en parties par million.

Azote*	192
Phosphore†	–
Potassium	490
Magnésium	59
Calcium‡	85
Fer	4,5
Manganèse	1
Bore	0,4
Cuivre	0,2
Zinc	0,09
Molybdène	0,5

* L'azote supplémentaire est fournie par l'acide nitrique de la solution-mère 3.
† Une certaine quantité de phosphore provient de l'acide phosphorique de la solution-mère 3.
‡ La teneur en calcium de l'eau n'est pas considérée.

Tableau 22 Formule d'engrais pour la culture sur film nutritif dans les régions où l'eau est douce

Solution-mère 1 Volume total 1 000 L	Solution-mère 2* Volume total 1 000 L	Solution-mère 3 Volume total 1 000 L
7,5 kg de nitrate de calcium	90,0 kg de nitrate de potassium	7,9 L d'acide nitrique (85 %)
	30,0 kg de phosphate de monopotassium	
	60,0 kg de sulfate de magnésium	
	3,0 kg de fer chélaté (15 % de fer)	
	0,4 kg de sulfate de manganèse	
	0,24 kg d'acide borique	
	80 g de sulfate de cuivre	
	40 g de sulfate de zinc	
	10 g de molybdate d'ammonium	

* Il peut s'avérer nécessaire d'acidifier légèrement la solution-mère 2 avec une petite quantité d'acide nitrique, ex. 20 mL, pour prévenir la précipitation d'un sel comme le phosphate de magnésium.

Note : En supposant que le rapport de dissolution est de 1/100 pour les solutions-mères 1 et 2, les concentrations d'éléments nutritifs dans la solution du film nutritif seraient théoriquement les suivantes en parties par million.

Azote*	214
Phosphore	68
Potassium	434
Magnésium	59
Calcium‡	128
Fer	4,5
Manganèse	0,4
Bore	0,2
Cuivre	0,09
Zinc	0,09
Molybdène	0,09

* L'azote supplémentaire est fourni par l'acide nitrique de la solution-mère 3; toutefois, la quantité d'acide nécessaire pour contrôler le pH de l'eau douce est beaucoup moins importante que celle requise pour l'eau dure.

‡ La teneur en calcium de l'eau n'est pas considérée.

Tableau 23 Solution nutritive recommandée pour les tomates cultivées sur film nutritif (proportion d'engrais par 1 000 L de solution-mère

Solution-mère 1 Volume total 1 000 L	Solution-mère 2 Volume total 1 000 L
99,0 kg de nitrate de calcium	49,7 kg de sulfate de magnésium
65,8 kg de nitrate de potassium	27,2 kg de phosphate de monopotassium
	3,0 kg de fer chélaté (13 %)
	0,5 kg de sulfate de manganèse
	180,0 g d'acide borique
	30,0 g de sulfate de cuivre
	35,0 g de sulfate de zinc
	8,0 g de molybdate d'ammonium

- Préparer la solution finale en ajoutant des volumes égaux des deux solutions-mères à de l'eau jusqu'à l'obtention d'une solution finale ayant une CE de 2 200 µS/cm; amener le pH à 6,2 en ajoutant de l'acide phosphorique (mauvais éclairement) ou de l'acide nitrique (bon éclairement). Idéalement, les solutions-mères sont mélangées et le pH est corrigé automatiquement par la conductivité électrique et les régulateurs de pH.
- Au démarrage d'une nouvelle culture, commencer avec une CE de 1 500 µS/cm et passer graduellement à 2 200 µS/cm en une semaine.
- En supposant que la CE de base de l'eau utilisée se situe entre 300 et 600 µS/cm.